

[19]中华人民共和国国家知识产权局

[51]Int. Cl<sup>6</sup>

H04B 1/66

H04L 5/06

## [12] 发明专利申请公开说明书

[21] 申请号 97198986.9

[43]公开日 1999 年 11 月 3 日

[11]公开号 CN 1234149A

[22]申请日 97.8.29 [21]申请号 97198986.9

[30]优先权

[32]96.8.30 [33]CA[31]2,184,541

[86]国际申请 PCT/CA97/00608 97.8.29

[87]国际公布 WO98/09383 英 98.3.5

[85]进入国家阶段日期 99.4.19

[71]申请人 加拿大贝尔公司

地址 加拿大魁北克省

[72]发明人 T·H·耶普 E·M·阿布德尔-拉赫姆

[74]专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司

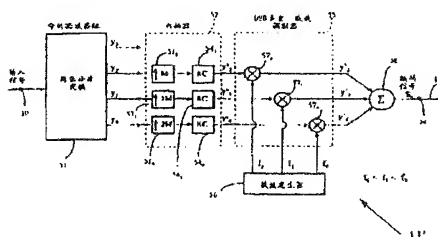
代理人 栾本生 王 岳

权利要求书 6 页 说明书 15 页 附图页数 17 页

[54]发明名称 子频带信号的频分多路复用传输

[57]摘要

一种用于处理输入信号供传输和/或存贮的方法和  
设备,利用分析滤波器组(21;51)将信号分解为用于调  
制一组载波的子频带信号。将载波组合为单一的编码信  
号供传输/存贮。编码器/解码器特别适用于远程通信  
系统和记录系统。分析滤波器组可以包括多分辨率滤波  
器,例如实现离散小波变换的倍频程频带滤波器组  
(40A/B/C/D... 43A/B/C/D)。调制可包括双边带,单边  
带,正交幅度调制等。在输入信号是模拟的场合,载波  
可由子频带信号直接调制。然而,当输入信号是数字  
时,子频带信号被内插,全都为相同速率,然后用于调制  
载波。相应的解码器(13)提取已调载波信号,将它们解  
调,逐十取一(如果适用的话),然后将它们综合以重建  
原始的输入信号。可以丢掉一个或多个子频带,尤其在  
是较高频率上的子频带。离散小波变换被应用于数字  
信号带。



专利文献出版社出版

ISSN 1000-8427 4

## 权 利 要 求 书

1. 一种用于对传输或存贮的输入信号编码和对这样的编码信号解码以重建输入信号的设备, 其特征在于:

一种编码器 (11) 包括:

- 5 (i) 分析滤波器装置 (21; 51), 用于将输入信号分解为一组子频带信号, 每个子频带集中在相应的一组频率中各自的一个上;
- (ii) 用于提供具有不同频率的一组载波信号的装置 (25; 56);
- 10 (iii) 调制装置 (22; 55), 用于利用至少若干子频带信号, 每个调制该组载波信号中各自的信号; 和
- (iv) 组合装置 (23; 58), 用于将已调载波信号组合, 形成编码信号供传输或存贮;

和一种解码器 (13) 包括:

- 15 (v) 滤波器装置 (31;  $61_0, 61_1, 61_2$ ), 用于从接收到的或记录的编码信号中提取该组已调载波信号;
- (vi) 用于提供相应于所述的编码器的载波信号的一组载波信号的装置 (35, 63);
- (vii) 解调装置 (32, 62), 用于利用至少若干载波信号解调已抽取的已调载波信号, 以抽取该相应的一组子频带信号; 和
- 20 (viii) 综合滤波器装置 (33; 67), 与所述的分析滤波器装置互补, 用于处理该组已抽取的子频带信号, 以产生相应于输入信号的解码信号。

25 2. 根据权利要求 1 的设备, 其特征在于该分析滤波器装置包括统一的滤波器组, 用于产生每个具有相同带宽的子频带。

3. 根据权利要求 1 的设备, 其特征在于该分析滤波器装置包括多分辨率滤波器组, 用于提供具有不同带宽的子频带。

4. 根据权利要求 3 的设备, 其特征在于多分辨率滤波器装置包括  
30 倍频程频带滤波器组 (40A/B/C/D, 41A/B/C/D, 42A/B/C/D, 43A/B/C/D), 实施离散小波变换 (DWT) 以产生一组小波作为所述的一组子频带信号, 和综合滤波器装置包括倍频程频带滤波器组 (图

4B), 实施相应的逆离散小波变换。

5. 根据权利要求 1 的设备, 进一步的特征在于, 为了对数字输入信号编码, 编码器 (11') 进一步包括内插装置 (52), 用于为每个子频带信号提供相邻的子频带信号的实际值之间的内插值, 解码器 (13') 还包括一个十进器 (66), 用于对已抽取的子频带信号逢 + 取 - 以便在施加到综合滤波器装置以前取去已内插的值, 内插率是这样选择, 使得所得的已内插的子频带信号全都具有相同的速率。

6. 根据权利要求 5 的设备, 其特征而在于内插装置 (52) 包括上采样品 ( $53_0, 53_1, 53_2$ ), 用于在实际值之间内插间隔, 和用于确定实际样本之间的值以及将这样一些确定的值插入到适当的间隔上的装置 ( $54_0, 54_1, 54_2$ )。

7. 根据权利要求 6 的设备, 其特征而在于确定装置 ( $54_0, 54_1, 54_2$ ) 包括升余弦滤波器装置。

8. 根据权利要求 6 的设备, 其特征而在于在编码器 (11) 中, 调制装置 (22; 55) 利用比所述的一组子频带信号的总数要少的信号调制所述的载波信号, 在解码器 (13) 中, 综合滤波器装置 (33; 67) 为未用的子频带信号替换成零电平信号。

9. 在根据权利要求 1 的设备中使用的一种编码器, 用于对输入信号编码供传输或存贮, 其特征而在于:

(i) 分析滤波装置 (21; 51), 用于将输入信号分解为一组子频带信号, 每个子频带以相应的一组频率中各自的频率为中心;

(ii) 用于提供具有不同频率的一组载波信号的装置 (25; 56);

(iii) 调制装置 (22; 55), 用于利用至少若干子频带信号, 每个调制该组载波信号中各自的载波信号; 和

(iv) 组合装置 (23; 58), 用于将已调载波信号组合, 以形成编码信号供传输或存贮。

10. 根据权利要求 9 的一种编码器, 供权利要求 2 的设备中使用, 其特征而在于, 分析滤波装置包括统一的滤波器组, 用于产生每个具有相同带宽的子频带。

11. 根据权利要求 9 的一种编码器, 供权利要求 3 的设备中使用,

其特征在于分析滤波装置包括多分辨率滤波器组，用于产生具有不同带宽的子频带。

12. 根据权利要求 11 的一种编码器，供权利要求 4 的设备中使用，其特征在于多分辨率滤波器组包括倍频程频带滤波器组  
5 (40A/B/C/D, 41A/B/C/D, 42A/B/C/D, 43A/B/C/D)，实现离散小波变换 (DWT)，产生一组小波作为所述的一组子频带信号。

13. 根据权利要求 9 的一种编码器，供权利要求 5 的设备中使用，其特征在于，为了对数字输入信号编码，编码器还包括内插装置  
10 (52)，用于为每个子频带信号，提供相邻的子频带信号的实际值之间的内插值，为了使用解码器，还包括一个十进器 (66)，用于对已抽取的子频带信号逢十取一，以便在施放到综合滤波器装置以前除去内插值，内插率这样选择，使所得的已内插子频带信号全都具有相同的速率。

14. 根据权利要求 13 的一种编码器，供权利要求 6 的设备中使用，  
15 其特征在于内插装置 (52) 包括上采样器 ( $53_0, 53_1, 53_2$ )，用于内插实际值之间的间隔，和滤波装置 ( $54_0, 54_1, 54_2$ )，用于确定实际样本之间的值以及将这样一些所确定的值插入到合适的间隔上。

15. 根据权利要求 14 的一种编码器，供权利要求 7 的设备中使用，  
20 其特征在于确定装置 ( $54_0, 54_1, 54_2$ ) 包括升余弦滤波器装置。

16. 根据权利要求 9 的一种编码器，供权利要求 8 的设备中使用，其特征在于调制装置 (22; 55) 使用比所述的一组子频带信号的总数要少的信号调制所述的载波信号。

17. 一种解码器 (13)，用于通过对输入信号分析滤波产生一组  
25 子频带信号进行编码的编码信号进行解码，利用至少若干子频带信号调制一组载波信号，并将已调载波信号组合，形成编码信号，解码器的特征在于：

滤波装置 (31;  $61_0, 61_1, 61_2$ )，用于从编码信号恢复该组已调载波信号；

30 装置 (35; 63) 用于提供与用作对编码信号编码的载波信号对应的一组载波信号；

解调装置 (32; 62)，用于至少利用若干载波信号解调已恢复的

已调载波信号, 提取相应的该组子频带信号; 和

综合滤波器装置 (33; 67), 与用于对编码信号编码的分析滤波器装置互补, 用于处理该组已抽取的子频带信号, 产生解码信号。

5 18. 根据权利要求 17 的解码器, 用于对数字输入信号编码得到的编码信号解码, 将子频带信号的相邻实际值之间值进行内插, 内插率这样选择, 使所得的已内插的子频带信号全都具有相同的速率, 解码器进一步以十进器 (66) 为其特征, 用于将已抽取的子频带信号逢十取一, 以便在施加到综合滤波器装置以前除去内插值。

10 19. 根据权利要求 17 或 18 的解码器, 其特征在于, 为了对已编码的信号解码, 利用比由分析滤波器装置产生的子频带总数要少的频带, 综合滤波器装置 (33; 67) 用零电平信号代替未用的子频带信号。

20. 一种用于对输入信号编码供传输或存贮和将这样一种已编码信号解码以重建输入信号的方法, 其特征在于输入信号的编码包括以下步骤:

15 (i) 利用分析滤波器装置, 将输入信号分解为一组子频带信号, 每个子频带集中在相应的一组频率中各自的频率上;

(ii) 提供一组具有不同频率的载波信号;

(iii) 利用至少若干子频带信号, 每个调制该组载波信号中各自的载波信号; 和

20 (iv) 将已调载波信号组合以形成编码信号供传输或存贮; 和对编码信号的解码包括以下步骤:

(v) 从接收到或记录的编码信号抽取该组已调载波信号;

(vi) 提供与在所述的编码中使用的载波信号对应的一组载波信号;

25 (vii) 利用至少若干载波信号对抽取的已调载波信号解调, 抽取相应的一组子频带信号; 和

(viii) 利用与所述的分析滤波器装置互补的综合滤波器装置, 处理该组已抽取的子频带信号以产生相应于输入信号的解码信号。

30 21. 根据权利要求 20 的方法, 其特征在于分析滤波利用统一的滤波器组产生每个具有相同带宽的子频带。

22. 根据权利要求 20 的方法, 其特征在于分析滤波利用多分辨率

滤波器组提供具有不同带宽的子频带。

23. 根据权利要求 22 的方法，其特征在于分析滤波利用倍频程频带滤波器组实现离散小波变换 (DWT)，以产生一组小波作为所述的一组子频带信号，和综合滤波和用倍频程频带滤波器组实现相应的逆离散小波变换。

24. 根据权利要求 20 的方法，其进一步的特征在于，为对数字输入信号编码，该编码还包括内插步骤，每个子频带在子频带信号相邻的实际值之间插入内插值，该解码还包括对已抽取的子频带信号逢十取一，以便在综合滤波以前除去内插值，内插率这样选择，使得所得的已内插的子频带信号全都具有相同的速率。

25. 根据权利要求 24 的方法，其特征在于内插包括将子频带信号上采样，在实际值之间内插间隔，利用以前的实际值确定内插值，并将这样一些已确定的内插值插入相应的间隔上。

26. 根据权利要求 25 的方法，其特征在于内插值的确定利用升余弦滤波。

27. 根据权利要求 20 的方法，其中调制利用少于所述的一组子频带信号的总数的信号调制所述的载波信号和，在处理中，通过综合滤波器装置，将未用的子频带信号由零电平信号替代。

28. 一种对输入信号编码供传输或存贮的方法，其特征在于以下步骤：

- (i) 利用分析滤波器将输入信号分解为一组子频带信号，每个子频带集中在相应的一组频率中各自的频率上；
- (ii) 提供一组具有不同频率的载波信号；
- (iii) 利用至少若干子频带信号，每个信号调制该组载波信号中各自的载波信号；和
- (iv) 将已调载波信号组合，形成编码信号供传输或存贮。

29. 根据权利要求 28 的编码方法，其特征在于分析滤波利用统一的滤波器组产生每个具有相同带宽的子频带。

30. 根据权利要求 28 的编码方法，其特征在于分析滤波利用多分辨率滤波器组提供具有不同带宽的子频带。

31. 根据权利要求 29 的编码方法，其特征在于分析滤波利用倍频程频带滤波器组实现离散小波变换 (DWT)，以产生一组小波作为所

述的一组子频带信号。

32. 根据权利要求 28 的编码方法，其特征在于，为了对数字输入信号编码，该编码还包括对每个子频带信号内插的步骤，在子频带信号相邻的实际值之间提供内插值，内插率这样选择，使所得的内插子频带信号全都具有相同的速率。

33. 根据权利要求 32 的编码方法，其特征在于内插包括对子频带信号上采样的步骤，在实际值之间建立间隔，确定实际样本之间的值并将这样一些所确定的值插入到相应的间隔上。

34. 根据权利要求 34 的编码方法，其特征在于值是利用升余弦滤波波确定的。

35. 一种对编码信号解码的方法，编码是通过对输入信号分析滤波，产生一组子频带信号，利用至少若干子频带信号调制一组载波信号，和将已调载波信号组合形成编码信号，该解码方法特征在于以下步骤：

从编码信号恢复该组已调载波信号；

提供对应于对编码信号编码所用的载波信号的一组载信号；

利用至少若干载波信号对已恢复的已调载波信号解调，提取该相应的一组子频带信号；和利用与用于对编码信号编码的分析滤波器装置互补的综合滤波器装置，处理该组已提取的子频带信号，产生解码信号。

36. 根据权利要求 35 的解码方法，用于对通过数字输入信号编码及在子频带信号的相邻实际值之间内插值得到的编码信号进行解码，内插率这样选择，使得所得的已内插的子频带信号全都具有相同的速率，该解码方法进一步特征在于将已提取的子频带信号逢十取一，以便在施加到综合滤波器装置以前除去内插值的步骤。

37. 根据权利要求 35 或 36 的解码方法，其特征在于，用于对利用比由分析滤波器装置产生的子频带的总数少的频带编码的编码信号进行解码，通过综合滤波器装置（33，67）进行的处理步骤用零电平信号代替未用的子频带信号。



# 说明书

## 子频带信号的频分多路复用传输

### 发明背景

#### 5 技术领域

本发明涉及一种对信号编码的方法与设备，不论信号是数字还是模拟，用于传输和/或存贮。本发明尤其，而不是排他性的，适用于通过通信信道传输的数字信号的编码，这些通信信道例如在远程通信系统中的双扭线用户回路或者适用于在存贮媒体上或中的信号存贮，如视频信号记录，声频记录，在计算机系统中的数据存贮，等。

#### 背景技术

本发明的实施方案特别适用于异步传输模式（ATM）的远程通信系统。这样的系统现在可达到在一秒钟内发送几百万位的数据并期望在以后的若干年内将未来的互作用概念变成令人鼓午的现实。然而，昂贵的端口成本以及利用称为光纤到家庭的结构，从 ATM 开关到用户房屋的光纤的布置成本阻碍 ATM 的部署。在用户回路部分中在现有的铜线上运行 ATM 传送将大大降低成本并使 ATM 到用户房屋的连接变得容易些。

在现有的双扭线用户回路中引入 ATM 信号导致对于位速率要求比通常系统可能达到的要高，在通常的系统中，存在着一种趋势，当以高的位速率发送时，要损失一部分信号，典型情况下，较高频率部分使信号质量受到很大的损失。这种情况在如所谓的双扭线的双线用户回路中尤其严重。利用正交幅度调制（QAM），可以满足不对称数字用户回路（ADSL）的要求，以规定的差错率传送高达每秒 1.5Mb 的速率的信号最多达 3 公里长的回路。展望 ADSL 系统将允许在 1 公里的回路上传送速率达到大约每秒 8Mb。然而，这些速率仍然认为是太低，当前对 ATM 基本用户接入提议的标准是大约每秒 26Mb 的速率。

QAM 系统倾向于工作在信道的较高频带上，这对于两线用户回路是特别不希望的，因为在较高的频率上衰减与串音较严重。因此，已经提议利用频分调制（FDM）将传输系统划分为一套频率标志的子信道。输入数据被分在临时的块中，每一块被独立地在各个子信道中调制和发送。一种这样的系统，称为离散多音调传输（DMT），被公开



在 1995 年 12 月发布的美国专利说明书 NO. 5, 479, 447 中, 并在下文  
中: “对于在高速用户环路中的 DMT 的快速算法的性能评价”, IEEE  
Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 13,  
NO. 9, December 1995 by I. Lee et al. 特别是, US 5, 479 447 公  
5 开了一种在数字化用户回路上对多重载波信号自适应的, 可变带宽  
的, 高速数据传输的方法与设备。将要传送的数据分为多重数据流,  
用来调制多重载波。这些受调载波在传输前通过 IFFT(逆快速富里哀  
变换) 变换为单一的高速信号。在接收机上, 快速富里哀变换(FFT)  
被用来将接收到的信号分离出受调载波, 将它们解调以得到原始的多  
10 重数据流。

这样一种 DMT 系统在两线用户回路中使用并不完全令人满意, 因  
为回路对噪声以及其它的降质源非常敏感, 这将导致一个或多个子信  
道损失。如果只有一个子信道故障, 可能因为传输路径噪声, 总信号  
被破坏, 或者损失, 或者, 如果应用检错的话, 可被重发。为了补救  
15 这个问题, 已经提议通过适当地消除有噪的子信道来解决, 但要这么  
做将包含非常复杂的电路。

利用 DMT 系统的另一个问题是子信道之间的隔离不良。在 1996  
年 3 月公布的美国专利说明书 NO. 5, 497, 398 中, M. A. Tzannes 和  
M. C. Tzannes 提议用迭代变换代替快速富里哀变换改善由于子信道损  
20 失引起的降质问题, 并得到较高的对脉冲群噪声的免疫力, 由此增加  
了在每个子信道中滤波器的主瓣和旁瓣之间的差别。迭代变换可以包  
括小波, 如以下文献中所公开的: M. A. Tzannes, M. C. Tzannes and  
H. L. Resnikoff: “对于使用 M-频带子波的非对称数字用户线(ADSL)  
的多载波收发信机”, ANSI Standard Committee T1E1.4  
25 Contribution 93-067, Mar. 1993 和 S. D. Sandberg, M. A. Tzannes: “对  
于高速铜线通信的重叠离散多音调制”, IEEE Journal on Selected  
Areas in Comm, Vol. 13, NO. 9, PP. 1571-1585, Dec. 1995, 这样一些系  
统称为“离散小波多音调”(SWMT)。

DMT 和 DWMT 系统的缺点是在通常情况下它们使用大量的子信  
30 道, 例如 256 或 512, 这导致复杂的, 成本高的设备及均衡和同步的  
困难。如果为了利用在较低频率上两线用户回路的较好的特性, 将在

较低频率上发送的位的数目增加，将在较高频率上发送的位的数目相应地减少，那么这些困难就会加剧。

大家知道，在存贮媒体，例如 CD 盘上记录以前，利用子频带滤波来处理数字声频信号。因此，美国专利说明书 NO. 5, 214, 678 (Rault et al) 公开了一种利用转换器和一组可以组合的分析滤波器将声频信号等编码为一组子频带信号的方案。Rault 等利用将子频带信号作为多重不同轨迹记录的记录装置。这并不完全令人满意，因为每个子频带信号需要它自己的记录头，或者，如果应用于传输，需要它自己的传输信道。

美国专利说明书 NO. 5, 161, 210 (Druy vesteyn) 公开了一种与 Rault 等所公开的类似的分析技术，在这种情况下，子频带信号在记录以前通过综合滤波器组合起来。输入声频信号首先被分析，一种识别信号与每个子频带信号混合。然后，子频带信号利用综合滤波器被重新组合。这种技术保证识别信号不可能通过平常的滤波被简单地除去。重新组合信号的频谱基本上与输入信号的频谱是相同的，所以它仍然对由较高频率组分的损失造成的破坏敏感。相应的解码器也包括一个分析滤波器和一个综合滤波器。因此，此设备是非常复杂的，并包含延时，这在高速传输系统中是不利的。

希望以这样的方法将子频带信号组合，使得能够降低由于部分信号损失或在传输和/或存贮期间遭损坏引起的破坏风险。

应该指出，虽然 Rault 等在他们的说明书中使用术语“分析滤波器”，在本说明书中术语“分析滤波器”将用来标记一种设备，它将一种信号以这样的方法分解成为一组子频带信号，使得利用一种相补的综合滤波器可以重建原始信号。

## 发明概述

本发明试图消除，或者至少减轻这些已知系统的缺点，作为其目的，提供一种用于对传输和/或存贮的信号进行编码的改进方法和设备。

依据本发明的一个方面，一种用于对传输或存贮的输入信号进行编码并对这样的编码信号解码以重建输入信号的设备，其特征在于：

一种编码器包括：

(i) 分析滤波器装置，用于将输入信号分解为一组子频带信

号，每个子频带集中在相应的一组不同频率中各自的一个上。

(ii) 用于提供一组具有不同频率的载波信号的装置；

5 (iii) 用于利用至少若干子频带信号的调制装置，每个子频带信号调制该组载波信号中各自的载波；和

(iv) 组合装置，用于将已调载波信号组合以形成编码信号供传输或存贮；和一种解码器包括

(v) 滤波器装置，用于从接收到的或记录的编码信号中提取该组已调载波信号；

10 (vi) 用于提供与所述的编码器的载波信号对应的一组载波信号的装置；

(vii) 解调装置，用于利用至少若干载波信号解调每个已提取的已调载波信号，以提取相应的一组子频带信号；和

15 (viii) 综合滤波器装置，与所述的分析滤波器装置互补，用于处理该组已提取的子频带信号，以产生相应于输入信号的解码信号。

依据本发明的第二和第三方面，在此提供设备本身的编码器和解码器。

20 分析滤波器装置可以是统一的，例如 M-频带滤波器组，或者是非统一的，例如“多重分辨率”滤波器组，如倍频程-频带或者二进的滤波器组，它们将产生具有不同带宽的子频带，典型情况下，每个是它相邻的滤波器的带宽的一半，或者甚至是短时快速富里哀变换单元。

25 在输入信号是数字化的场合，分析滤波器装置可以包括一个实现离散小波变换 (DWT) 的倍频程频带滤波器组。

30 为了对数字输入信号编码，编码器可以进一步包括内插装置，用于为每个子频带信号提供子频带信号的相邻实际值之间的内插值。然后解码器将包括一个十进器，用于将已抽取的子频带信号十中取一，以便在施加到综合滤波器装置以前除去内插值。内插率与有关的子频带的采样率成比例，因此得到的内插子频带信号全具有相同的速率。

内插率将依据特定的传输信道或存贮装置的要求来选择，但典型情况下将是 1: 8 或更高的数量级。

内插装置可包括一个上采样器，用于内插实际值之间的间隔，和滤波器装置，例如升余弦滤波器装置，用于确定实际样本之间的值并将它们插到适当的间隔上。

通常，当使用数字信号时，子频带分析滤波器建立子频带信号，它与原始信号相比占据宽谱，这使调制困难，将子频带信号内插与平滑有利于对子频带信号频谱的频带限制，允许各种各样的技术进行调制，例如双或单边带幅度调制，正交幅度调制（QAM），载波幅度/相应调制（CAP），等。

依据本发明的第四方面，在此提供一种方法，对用于传输或存贮的输入信号编码以及对这样的编码信号解码以重建输入信号，其特征在于输入信号的编码包括以下步骤：

- (i) 利用分析滤波器装置，分解输入信号为一组子频带信号，  
每个子频带集中在相应的该组频率中各自的一个上；
  - (ii) 提供具有不同频率的一组载波信号；
  - 15 (iii) 利用至少若干子频带信号，每个调制该组载波信号中各自的载波信号；和
  - (iv) 将已调制载波信号组合以形成编码信号供传输或存贮；
- 编码信号的解码包括以下步骤：
- 20 (v) 从接收到的或记录的编码信号抽取该组已调制的载波信号；
  - (vi) 提供与所述的编码中使用的载波信号对应的一组载波信号；
  - (vii) 利用至少若干载波信号对已抽取的已调载波信号解调以抽取该相应的一组子频带信号；和
  - 25 (viii) 利用与所述的分析滤波器装置互补的综合滤波器装置，处理该组已抽取的子频带信号以产生相应于输入信号的解码信号。

依据本发明的第五和第六方面，在此提供编码本身的方法和解码本身的方法。

30 在本发明以上各方面中任一方面的实施方案中，利用离散小波变换，数字输入信号可被分成段，离散小波变换用于变换数字信号的相继的段。

在输入信号是模拟的场合，它可被数字化并采样，然后分段（如合适的话）。然而，在利用倍频程频带滤波器组实现 DWT 的场合，输入信号分段是不需要的。另外的办法，模拟分析滤波器组可直接用于连续模拟信号，每个子频带信号包括不同中心频率。

5 从以下的本发明的最佳实施方案的详述中可使本发明上述及其它方面的目的，特征，及优点更加明白，这是通过只参考附图用举例的方法进行描述来实现的。

附图简述：

10 图 1 是说明一种包括依据本发明的编码器和解码器的传输系统的简图；

图 2 是实施本发明的一种编码器的简要方框图；

图 3 是对于来自图 1 的编码器的信号的相应的解码器的简要方框图；

15 图 4A 说明利用锥形算法提供子频带信号的三级离散小波变换分解；

图 4B 说明来自图 4A 的子频带信号的输出信号的三级综合；

图 5 是编码器的方框简图，利用子频带分析滤波器和带有三个子频带及相应载波的双边带幅度调制；

20 图 6 是解码器的方框简图，利用三个子频带和用于图 5 的编码器的载波；

图 7A, 7B 和 7C 说明输入信号，和在多重载波 SSB 调制前后三个子频带信号的频谱；

图 8 作为例子，示出施加到图 5 的编码器的一种非常简单的输入信号  $S_i$ ；

25 图 9A, 9B, 9C 和 9D 示出由图 8 的输入信号  $S_i$  的分析滤波产生的子频带小波信号  $y_0$ ,  $y_1$ ,  $y_2$  和  $y_3$ ；

图 10A, 10B, 和 10C 示出分别由子频带小波信号  $y_0$ ,  $y_1$ ,  $y_2$  调制的已调载波信号  $y_0'$ ,  $y_1'$  和  $y_2'$ ；

图 11 示出编码/发送的信号  $S_0$ ；

30 图 12 示出发送信号  $S_0$  的功率谱；

图 13A, 13B 和 13C 示出已恢复的小波已调载波， $y_0''$ ,  $y_1''$  和  $y_2''$ ；

图 14A, 14B 和 14C 示出已恢复的小波信号  $y_0^*$ ,  $y_1^*$  和  $y_2^*$ ；

和

图 15 示出重建的信号

## 最佳实施方案的描述

一种实施本发明的传输系统示于图 1 中, 系统包括数字输入信号源 10, 编码器 11, 传输媒体 12, 解码器 13 和信号目的地 14。来自信号源 10 的输入信号  $S_i$  被施加到编码器 11, 利用子频带滤波和多重载波调制对其编码并将得到的编码信号  $S_0$  供给传输媒体 12, 由传输信道 15, 噪声源 16 和相加器 17 作为代表, 后者在其达到解码器 13 以前在传输信道 15 中将信号与噪声组合。虽然示出了传输媒体 12, 它可由模拟存贮媒体替代。解码器的输出供给信号目的地 14。信道 15 可用的带宽支配着可在信道上传输的信号的最大允许速率。

编码器 11 的第一实施方案较详细地示于图 2 中。输入信号  $S_i$  通过输入口 20 施加到分析滤波器组 21, 将它分解为子频带。以产生/抽取低通子频带信号  $y_0$ , 带通子频带信号  $y_1 - y_{N-2}$  和高通子频带信号  $y_{N-1}$ 。正如以下将要解释的, 子频带信号  $y_1 - y_{N-1}$  被供给多重载波调制器 22, 利用每个子频带信号调制所选信号的各个载波。低通子频带信号  $y_0$  比其它子频带信号包含更多的低频组分, 用于调制低频载波  $f_0$ ; 带通子频带信号  $y_1 - y_{N-2}$  和高通子频带信号  $y_{N-1}$  比低通小波信号  $y_0$  具有更多的高频组分, 因此分别用于调制较高频率载波信号  $f_1 - f_{N-1}$ , 频率增加从  $f_1$  到  $f_{N-1}$ 。已调载波信号  $y_0' - y_{N-1}'$  由相加器 23 组合, 以形成编码输出信号  $S_0$ , 通过输出口 24 发送到传输媒体 12, 传输到解码器 13 (图 1)。

现在将参考图 3 描述一种适合的解码器 13, 用于对编码输出信号解码, 在通过传输媒体 12 以后, 所发送的信号  $S_0$  可能被衰减并包含噪声。因此, 当由解码器在口 30 上接收到时, 它被识别为接收到的信号  $S_0'$  (带撇的符号表明它并不与包含的信号  $S_0$  完全一致) 并供给滤波器阵 31。在阵 31 中每个滤波器相应于多重载波调制器 22 (图 2) 的频率  $f_0 - f_{N-1}$  中每个频率, 并恢复相应的已调载波信号。恢复的已调载波信号  $y''_0 - y''_{N-1}$  由阵分开, 然后由多重载波解调器 32 解调, 以便恢复分别相应于编码器 11 中的子频带信号  $y_0 - y_{N-1}$  的低通, 带通和高通子频带信号  $y_0^* - y_{N-1}^*$ 。恢复的子频带信号被供给综合滤波器组 33, 它以与分析滤波器组 21 互补和相逆的方式工作, 产生与图 2 中输入信号  $S_i$  极相似的输出信号  $S'_0$ , 并通过输出口 34 供给信号目的地 14。通常, 恢复的信号  $S'_0$  将利用一种自适应均衡器进行均衡以补偿由信

道 12 引入的畸变和噪声。

应该指出, 如果图 2 中的高通子频带信号  $y_{N-1}$  和若干子频带信号  $y_0-y_{N-2}$  与其它子频带信号相比包含很少的传输功率, 则它们可不需要发送。当这些子频带信号不发送时, 在图 3 中所示的综合滤波器组 33 将零插入代替短缺的子频带信号。那末重建的信号  $S'_i$  将只是极近似于原始的输入信号  $S_i$ 。一般, 所用的子频带越多, 近似越好。

最好的做法是, 分析滤波器 21 是一种实现离散小波变换 (DWT) 的多分辨率滤波器组。为了便于更好地理解使用 DWT 的实施方案, 首先给出离散小波变换 (DWT) 的简要介绍。DWT 代表作为称为小波的基本函数族的叠加的一种任意的平方可积函数。小波基本函数族可由与本族对应的母小波转化与扩张产生。DWT 系数可通过取输入信号与小波函数之间的内积来获得。因为基本函数是互相的转化与扩张的类型, 一种较简单的, 称为 Mallat's tree 算法或锥形算法的算法已由 S. G. Mallat 在下文中提出: “多谐信号分解的理论: 小波表示”, IEEE trans on Pattern Recognition and Machine Intelligence, Vol. 11, No. 7, July 1989. 在此算法中, 每一级的 DWT 系数可从前级的 DWT 系数算得, 表达如下:

$$W_L(n, j) = \sum_m W_L(m, j-1) h(m-2n) \quad (1a)$$

$$W_H(n, j) = \sum_m W_L(m, j-1) g(m-2n) \quad (1b)$$

其中  $W(p, q)$  是在第  $q$  级的第  $p$  个小波系数,  $h(n)$  和  $g(n)$  分别是相应于定标与小波函数的扩张系数。

为了计算离散时间数据的 DWT 系数, 假定输入数据代表高分辨率级的 DWT 系数。等式 (1a) 和 (1b) 可用来获得相继级的 DWT 系数。实际上, 这种分解只对少数级实施。应该指出, 扩张系数  $h(n)$  代表低通滤波器, 而系数  $g(n)$  代表高通滤波器。因此 DWT 以不同的比例从信号中抽取信息。小波分解的第一级抽取信号的细节 (高频组分), 而小波分解的第二和所有相继的级逐渐地提取较粗的信息 (较低频率组分)。应该指出, 被紧密支持的小波可由带有所谓的倍频程频带树状结构机构的完全重建的两信道滤波器组来产生。正交和双正交滤波器



组可用于产生这些系统中的小波。一种用于离散小波变换的三级倍频程频带树状结构将参考图 4A 和 4B 进行描述, 在其中不同级中相同的组分具有相同的参考号码, 但是带有该级的后缀字母。

参考图 4A, 三个分解级 A, B 和 C 具有不同的采样率。三个级 A, B 和 C 中每一个包括与下采样器 41 串联的高通滤波器 40, 和与下采样器 43 串联的低通滤波器 42。每个低通滤波器 42 的截止频率基本上与有关的高通滤波器 40 的截止频率相同。在每级中, 截止频率等于该级采样率的四分之一。

输入信号  $S_i$  的  $N$  个样本共同地供给高通滤波器 40A 和低通滤波器 42A 的输入。相应的来自高通滤波器 40A 的  $N$  个高频样本被下采样器 41A 以因子 2 下采样。所得的  $N/2$  个样本作为高通小波  $y_3$  供给输出。来自低通滤波器 42A 的  $N$  个低频样本被下采样器 43A 以因子 2 下采样, 所得的  $N/2$  个样本供给级 B, 在此重复相同的步骤。在级 B 中, 来自高通滤波器 40B 的  $N/2$  个较高频率的样本被下采样器 41B 下采样, 所得的  $N/4$  个样本作为带通小波  $y_2$  供给输出。来自低通滤波器 42B 的其它的  $N/2$  个样本被下采样器 43B 下采样, 所得的  $N/4$  个样本供给第三级 C, 在其中高通滤波器 40C 和下采样器 41C 将它们以相同的方式处理, 以在输出提供  $N/8$  个样本作为带通小波  $y_1$ 。来自低通滤波器 42C 的其它  $N/4$  个样本被下采样器 43C 下采样, 给出  $N/8$  个样本并将它们作为低通小波  $y_0$  供给输出。

应该指出, 结果输入信号段包括, 例如, 1024 个样本或数据点, 小波  $y_0$  和  $y_1$  只包括 128 个样本, 小波  $y_2$  包括 256 个样本和小波  $y_3$  包括 512 个样本。

代替图 4A 的倍频程频带结构, 一套一个低通, 两个带通滤波器和一个高通滤波器可被平行地以不同的下采样率使用。

现参考图 4B, 为了重建原始的输入信号, DWT 小波信号被上采样并通过另一套低通和高通滤波器, 其工作情况可表达如下:

$$W_L(n, j) = \sum_k W_L(k, j+1) h'(n-2k) + \sum_l W_H(l, j+1) g'(n-2l) \quad (2)$$

其中  $h'(n)$  和  $g'(n)$  分别是相应于母小波的低通和高通综合滤波器。从等式 2 观察到, 第  $j$  级的 DWT 小波信号可从第  $(j+1)$  级的 DWT

系数得到。

紧密支持的小波通常用于各种应用中。表 1 列出了几个正交小波滤波器系数  $h(n)$ ，它们在各种应用中是很通用的，如下文所公开的：I Daubechies, "Orthonormal bases of compactly supported wavelets", Comm. Pure Appl. Math, Vol. 41, PP. 906-966, 1988. 这些 5 小波对于给定的阶具有零矩数目最大的性质，并被称为 "Daubechies 小波"。

系数	小波	
	Daub-6	Daub-8
$h(0)$	0.332671	0.230378
$h(1)$	0.806892	0.714847
$h(2)$	0.459878	0.630881
$h(3)$	-0.135011	-0.027984
$h(4)$	-0.085441	-0.187035
$h(5)$	0.035226	0.030841
$h(6)$		0.032883
$h(7)$		-0.010597

表 1

现参考图 5 描述本发明的一种实施方案，其中较高的子频带并不发送，并利用离散小波变换对数字信号编码。在图 5 的发射机/编码器 11' 中，输入信号  $S_i$  被供给分析滤波器装置的一个输入口 20，该分析滤波装置包括一个倍频程频带滤波器组 51，对信号  $S_i$  应用如图 4A 中所示的离散小波变换，产生低通子频带小波信号  $y_0$ ，两个带通子频带小波信号  $y_1$  和  $y_2$ ，和高通子频带小波信号  $y_3$ 。在这种实施方案中，只有子频带小波信号  $y_0$ ， $y_1$  和  $y_2$  将被处理。高通子频带小波信号  $y_3$  被丢掉。内插装置 52 将子频带小波信号  $y_0$ ， $y_1$  和  $y_2$  分别以因数  $2M$ ， $2M$  和  $M$  内插，其中  $M$  是一个整数，典型值为 8 到 24，这样一来，三个子频带小波信号 ( $y_0$ ， $y_1$  和  $y_2$ ) 具有相等的采样率。因此，在内插器 52 内，子频带小波信号  $y_0$ ， $y_1$  和  $y_2$  分别被上采样器 53<sub>0</sub>，53<sub>1</sub> 和 53<sub>2</sub> 上采样，在实际样本之间的间隔上插入零值样本。然后已上采样的信号分别被三个升余弦滤波器 54<sub>0</sub>，54<sub>1</sub> 和 54<sub>2</sub> 滤波，在每个已上采样的“零”点上插入从前面的样本的实际值算得的样本，优先使用升余弦

滤波器使得符号间干扰最小。三个已内插的子频带小波信号被供给双边带 (DSB) 多重载波调制器 55, 利用这些信号来调制三个分开的载波信号  $f_0$ ,  $f_1$  和  $f_2$ , 其中  $f_0 < f_1 < f_2$ , 由载波发生器 56 提供。调制器 55 包括乘法器  $57_0$ ,  $57_1$  和  $57_2$ , 它们分别将载波信号  $f_0$ ,  $f_1$  和  $f_2$  用三个已内插的小波信号  $y_0''$ ,  $y_1''$  和  $y_2''$  相乘。所得的三个已调载波信号  $y_0'$ ,  $y_1'$  和  $y_2'$  由相加器 58 迭加在一起, 形成编码信号  $S_0$ , 通过口 24 的方法传输到传输媒体 12。

在相应的图 6 中所示的解码器 13' 上, 在口 30 接收到的信号  $S'$  被供给三个带通滤波器  $61_0$ ,  $61_1$  和  $61_2$  的每一个, 恢复已调的载波信号  $y_0''$ ,  $y_1''$  和  $y_2''$ 。所恢复的已调载波信号  $y_0''$ ,  $y_1''$  和  $y_2''$ 。利用多重载波双边带 (DSB) 解调器 62 进行解调。载波发生器 63 产生具有频率为  $f_0$ ,  $f_1$  和  $f_2$  的载波信号, 它们被供给解调器 62 内的乘法器  $64_0$ ,  $64_1$  和  $64_2$ , 并且分别将载波信号  $f_0$ ,  $f_1$  和  $f_2$  用已恢复的已调载波信号  $y_0''$ ,  $y_1''$  和  $y_2''$  相乘。DSB 解调器 62 包括低通滤波器  $65_0$ ,  $65_1$  和  $65_2$ , 分别用于对乘法器  $64_0$ ,  $64_1$  和  $64_2$  的输出滤波, 如同在 DSB 解调器中常用的那样。

来自滤波器  $65_0$ ,  $65_1$  和  $65_2$  的已调信号分别由十进制器单元 66 的十进制器  $66_0$ ,  $66_1$  和  $66_2$  按  $2M$ ,  $2M$  和  $M$  抽取, 所得的已恢复的子频带信号  $y_0''$ ,  $y_1''$  和  $y_2''$  每个供给综合滤波器组 67 的四个输入中对应的一个输入, 对它们施加示于图 4B 中的逆离散小波变换 (IDWT), 用于恢复与输入信号  $S_i$  相应的信号  $S_i'$ 。未发送的高通子频带小波信号  $y_3$  被在综合滤波器组 67 的相应的“最高”频率输入 68 上用“零”来代替。来自综合滤波器组 67 的所得的输出信号  $S_i'$  是通过输出口 34 提供的解码器输出信号, 并且是供给图 5 的编码器 11' 的输入信号  $S_i$  的最接近的近似。

所发送的信号  $S_0$  的带宽比原始信号  $S_i$  的带宽要宽, 因为每个子频带具有上和下边带。利用单边带 (SSB) 调制可使带宽减少。为了做到这点, 图 5 的编码器 11' 可通过将乘法器  $57_0$ ,  $57_1$  和  $57_2$  的每一个用 SSB 调制器替代来作修改。图 7A, 7B 和 7C 示出编码器和 SSB 调制的工作情况。为了图示的方便, 采用简化的信号。

图 7A 示出简化的输入信号  $S_i$  的频谱, 占据以频率  $f_c$  为中心的带宽 BW。如图 7B 所示, 在分析滤波与内插以后, 输入信号  $S_i$  已被分为

三个已内插的子频带信号  $y_0''$ ,  $y_1''$  和  $y_2''$ 。应该指出, 对于复杂的输入信号, 在内插以前子频带信号  $y_0$ ,  $y_1$  和  $y_2$  具有非常宽的频谱。在由内插器 52 (图 5) 上采样与滤波以后, 子频带信号  $y_0''$ ,  $y_1''$  和  $y_2''$  每个具有的频谱要比原始信号  $S_i$  的频谱窄。

5 在由 DSB 多重载波调制装置 55 调制以后, 相应的已调载波  $y_0'$ ,  $y_1'$  和  $y_2'$  的带宽  $BW_0$ ,  $BW_1$  和  $BW_2$  由输入信号  $S_i$  的采样率确定。如果所有的子频带被使用的话, 总的带宽  $BW_0 + BW_1 + BW_2 + 2G$  可以大于带宽  $BW$ , 如果只有两个被使用, 则可小于它。来自相加装置 58 的输出信号  $S_0$  具有的频谱, 如图 7C 中所示, 为三瓣, 也就是以频率  $f_0$  为中心的低频瓣, 以频率  $f_1$  为中心的中频瓣和以频率  $f_2$  为中心的高频率瓣, 三瓣由两个保护频带  $G$  互相分开, 以避免干扰并保证每个载波信息只用于它自己的子频带。

15 输入信号  $S_i$  的简化型式, 子频带小波信号  $y_0$ ,  $y_1$ ,  $y_2$  和  $y_3$ , 子频带小波已调载波  $y_0'$ ,  $y_1'$  和  $y_2'$  和所发送的信号  $S_0$ , 与图 2 和 5 的编码器中的类似, 示于图 8-10 中。图 8 示出简化的输入信号  $S_0$ , (与图 7A 中所示的并不是相同的)。图 9A, 9B, 9C 和 9D 示出通过对输入信号  $S_i$  的 DWT 处理获得的子频带小波信号  $y_0$ ,  $y_1$ ,  $y_2$  和  $y_3$ 。图 10A, 10B 和 10C 示出分别通过用子频带小波信号  $y_0$ ,  $y_1$  和  $y_2$  对载波信号  $f_0$ ,  $f_1$ ,  $f_2$  调制所得的相应的已调载波信号  $y_0'$ ,  $y_1'$ ,  $y_2'$ 。因为简化的输入信号的波形是如此的平滑, 小波信号  $y_2$  只用因数 2 内插, 小波信号  $y_0$  和  $y_1$  只用因数 4 内插。当然, 这只是为了图示说明; 实际上, 典型情况下内插器的范围可从 1: 8 到 1: 24。图 11 示出编码信号  $S_0$  和图 12 示出它的频谱, 它分别包括对于一个消息速率为 750Hz 的以频率 1000Hz, 3000Hz 和 5000Hz 为中心的频谱组分  $y_0'$ ,  $y_1'$  和  $y_2'$ 。应该指出传输功率在低和高频载波之间的不对称分配。应该理解, 这些简化的信号只是用于图示说明, 实际信号要复杂得多。

25 图 13A, 13B 和 13C 示出已恢复的已调载波信号  $y_0''$ ,  $y_1''$  和  $y_2''$ , 和图 14A, 14B 和 14C 示出已恢复的子频带小波信号  $y_0^*$ ,  $y_1^*$ ,  $y_2^*$ 。最后, 图 15 示出重建的信号  $S_i'$ , 它可能看上去是图 8 中所示的输入信号  $S_i$  最接近的近似。

30 在以上所述的实施方案中, 高通子频带信号  $y_3$  未被使用, 这是由于它可能包含可忽略的能量。然而, 如果它具有较大的能量, 它可被

使用，编码器和解码器可作适当的修改。

虽然利用两个以上子频带和载波的类似的实施方案是可能的，在某些情况下可能是所希望的，但对于大多数的应用来说，尤其是对于通过绞线用户回路的数字信号通信，它们被认为是太复杂并且在性能上无多大改进。

应该理解，其它类型的调制可用于调制子频带信号，例如，窄频带频率调制，等。

应该理解，信号源 10 和编码器 11 可以是具有其它信号处理装置的发射机的部件。同样，解码器 13 和信号目的地 14 可以是相应的接收机的部件。

虽然上述的本发明的实施方案利用三个或更多的子频带信号，可以设想，其它的应用，如深空通信，可能只利用一个或两个小波。

#### 工业适用范围

利用子频带信号调制载波的本发明实施方案的一个优点是传输可靠，因为在系统中一个子频带的损伤只是使传输系统稍稍有些降质。而且，解码器带通滤波器可很容易地被设计，因为只使用几个频率段。况且，在包含数据传输的应用中，数据同步以及钟的恢复可很容易在解码器中实现。

应该指出，本发明不限于传输系统，可被用于不管噪声与衰减而保持信号完整性的其它目的。例如，它可用于在 CD 盘或其它存贮媒体上记录信号。因此，存贮媒体可等同于图 1 中的传输媒体 12。应该理解，在此所描述的编码器和解码器可能通过一个适当地编程的数字信号处理器或者作为一个定做的集成电路来实现。

虽然本发明的实施方案已详细地描述和图解说明，应该清楚地理解，所述内容只是作为图解说明和举例，并不是作为限制。本发明的范围仅由所附的权利要求所限定。

#### 参考文献

[Mallat 1989] S. G. Mallat, “多谐信号分解的理论：子波表示”  
IEEE Trans. on Pattern Recognition and Machine Intelligence,  
Vol. 11, NO. 7, July 1989.

[Daubechies 1988] I Daubechies, “密实地支援子波的标准正交基”，Comm. Pure Appl Math, Vol 41, PP. 906-966, 1988

[Bingham 1990] J. A. C. Bingham, “数据传输的多载波调制: 一个现实的想法”, IEEE Comm. Magazine, Vol. 28, Apr. 1990.

[Chow-1991] J. S. Chow, J. C. Tu, and J. M. Cioffi, “对于高比特率数字用户线 (HDSL) 应用的离散多音收发信机系统”, IEEE J. on  
5 Selected Areas in Comm, Vol. 9 NO. 6, PP 895-908. Aug 1991.

[Tzannes 1993] M. A. Tzannes, M. C. Tzannes and H. L. Resnikoff, “DWMT: 对于使用 M-频带子波的非对称数字用户线 (ADSL) 的多载波收发信机”, ANSI Standard Committee T1E1.4 Contribution 93-067, Mar. 1993.

10 [Sandberg 1995] S. D. Sandberg, M. A. Tzannes, “对于高速铜线通信的重叠离散多音调制”, IEEE J. on Selected Areas in Comm, Vol. 13, NO. 9, PP. 1571-1585, Dec. 1995.

## 参考文献

- [Mallat 1989] S. G. Mallat, "A theory of multiresolution Signal decomposition the wavelet representation," IEEE Trans. on Pattern Recognition and Machine Intelligence, Vol. 11, NO. 7, July 1989.
- [Daubechies 1988] I. Daubechies, "Orthonormal bases of Compactly supported wavelets", Comm. Pure Appl Math, Vol 41, PP. 906-966, 1988
- [Bingham 1990] J. A. C. Bingham, "Multicarrier Modulation for Data Transmission: An Idea Whose Time Has Come", IEEE Comm. Magazine, Vol. 28, Apr. 1990.
- [Chow-1991] J. S. Chow, J. C. Tu, and J. M. Cioffi, "A Discrete Multitone Transceiver System for HDSL Applications", IEEE J. on Selected Areas in Comm, Vol. 9 NO. 6, PP 895-908. Aug 1991.
- [Tzannes 1993] M. A. Tzannes, M. C. Tzannes and H. L. Resnikoff, "The DWMT: A Multicarrier Transceiver for ADSL using M-band Wavelets", ANSI Standard Committee T1E1.4 Contribution 93-067, Mar. 1993.
- [Sandberg 1995] S. D. Sandberg, M. A. Tzannes, "Overlapped Discrete Multitone Modulation for High Speed Copper Wire Communications", IEEE J. on Selected Areas in Comm, Vol. 13, NO. 9, PP. 1571-1585, Dec. 1995.



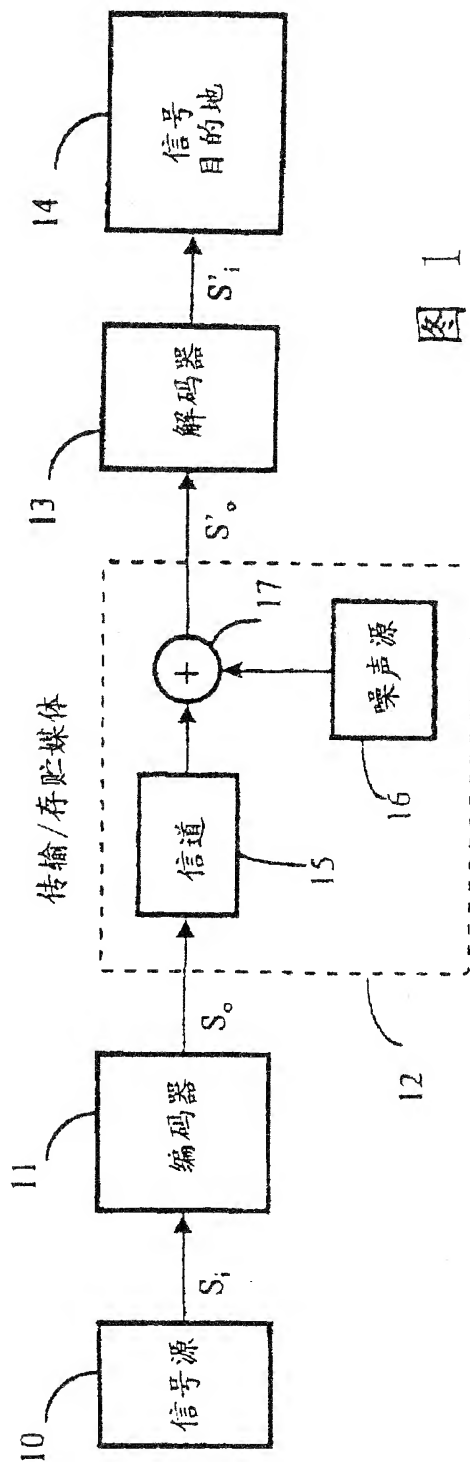
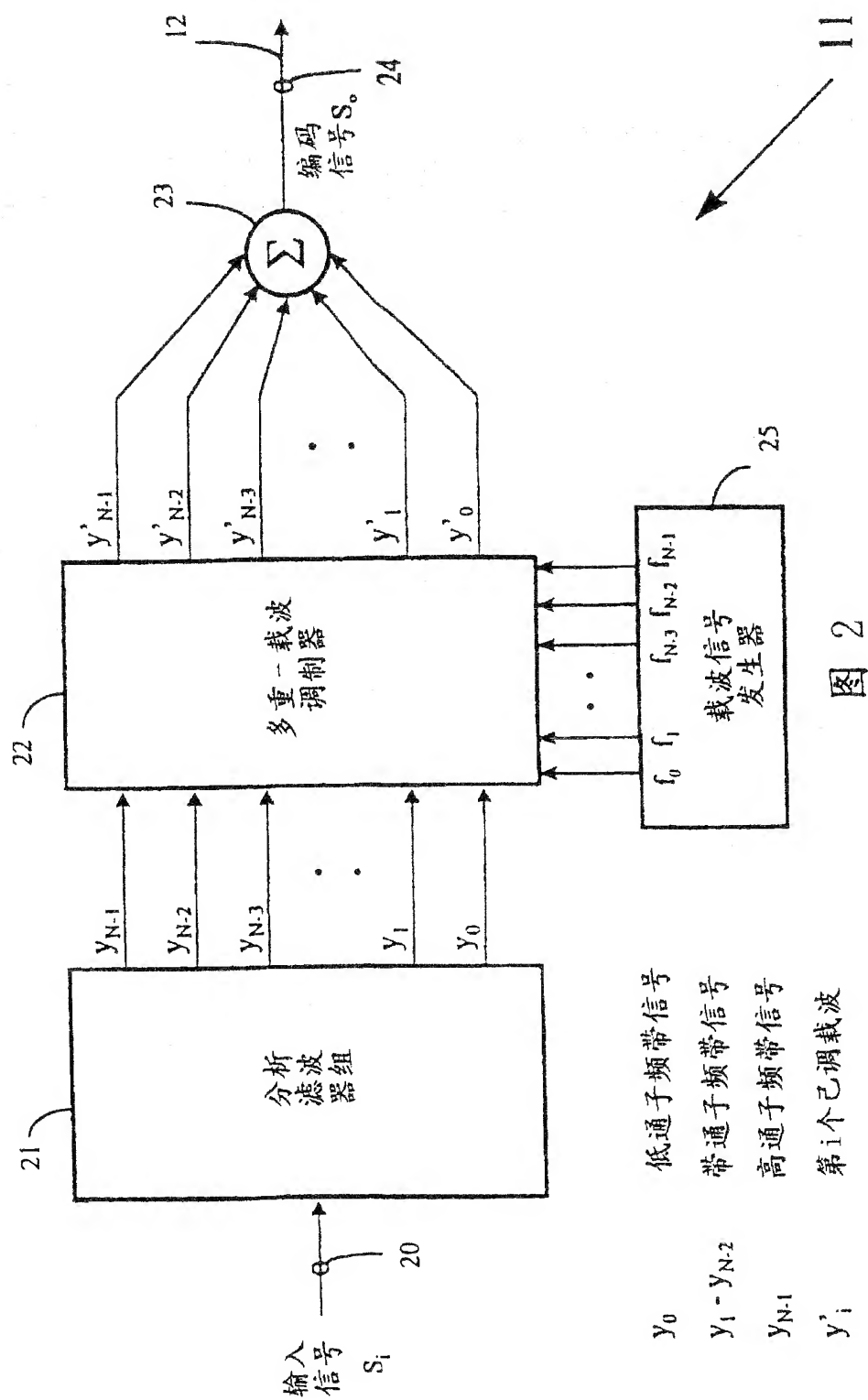


图 1



$y_0$  低通子频带信号  
 $y_1 \sim y_{N-2}$  带通子频带信号  
 $y_{N-1}$  高通子频带信号  
 $y'_i$  第  $i$  个已调载波

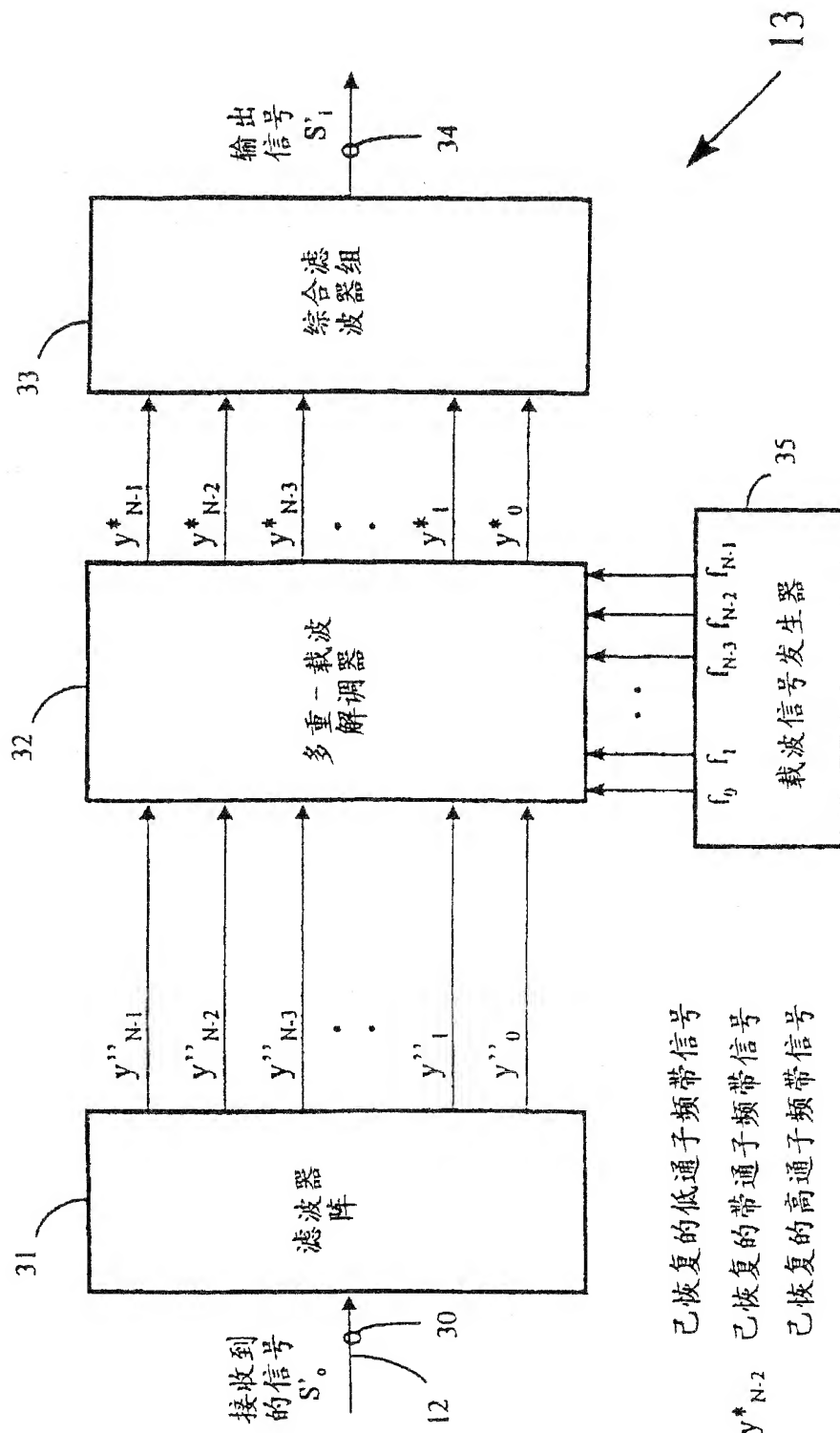


图 3

$y^*_0$  已恢复的低通子频带信号  
 $y^*_1 - y^*_{N-2}$  已恢复的带通子频带信号  
 $y^*_{N-1}$  已恢复的高通子频带信号  
 $y''_i$  已恢复的第  $i$  个已调载波

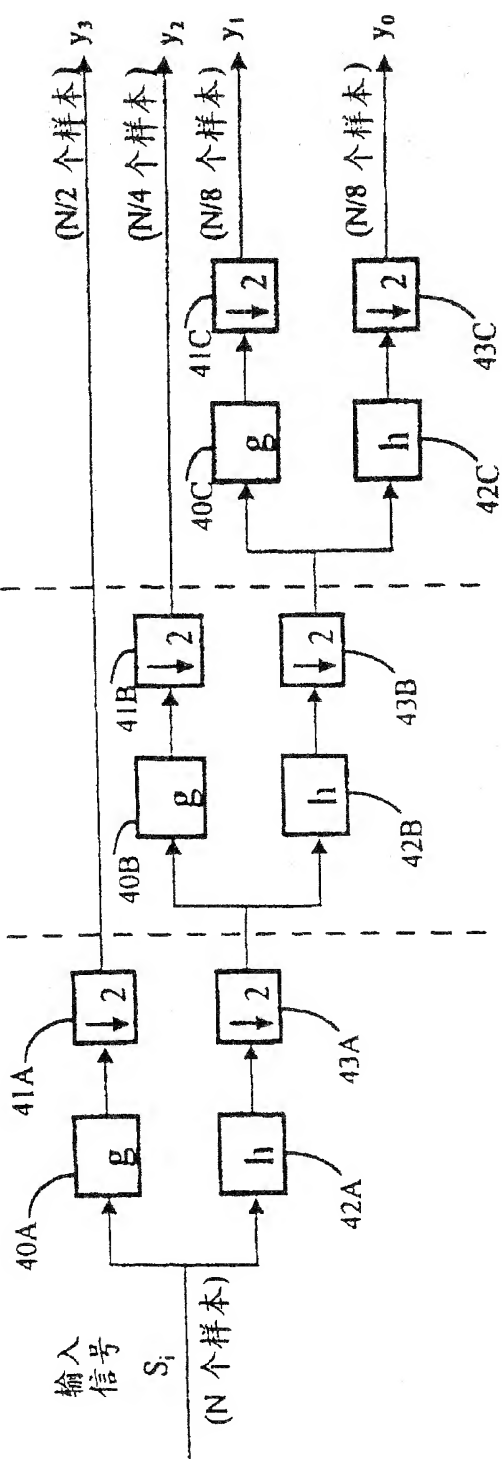


图 4A

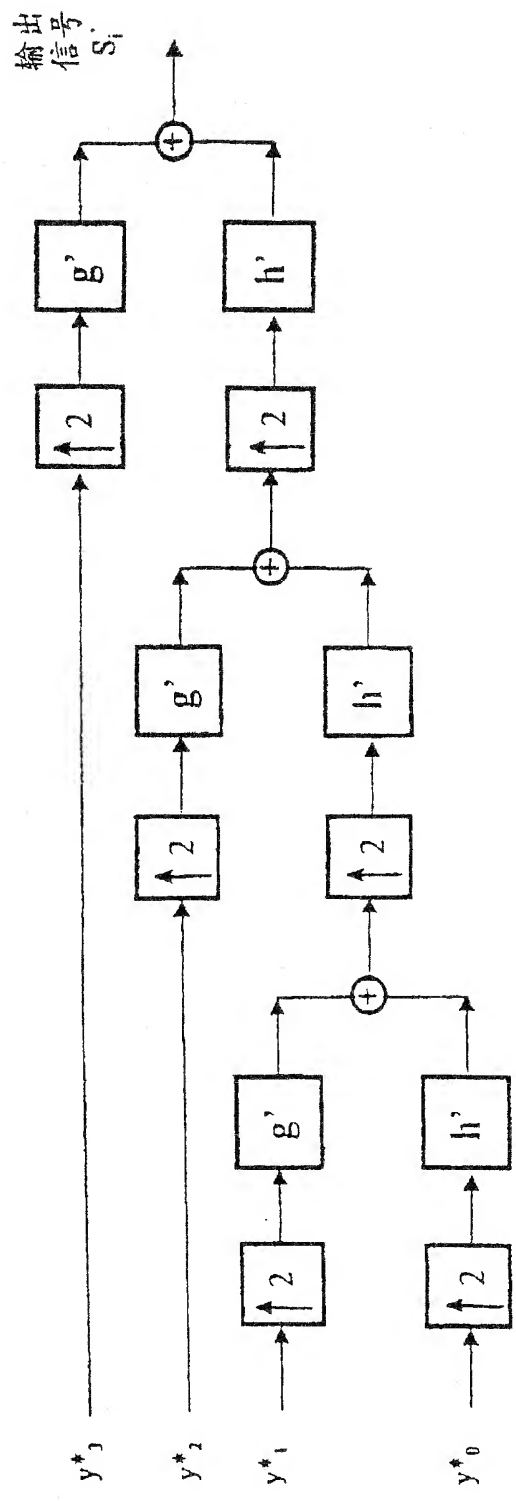


图 4B

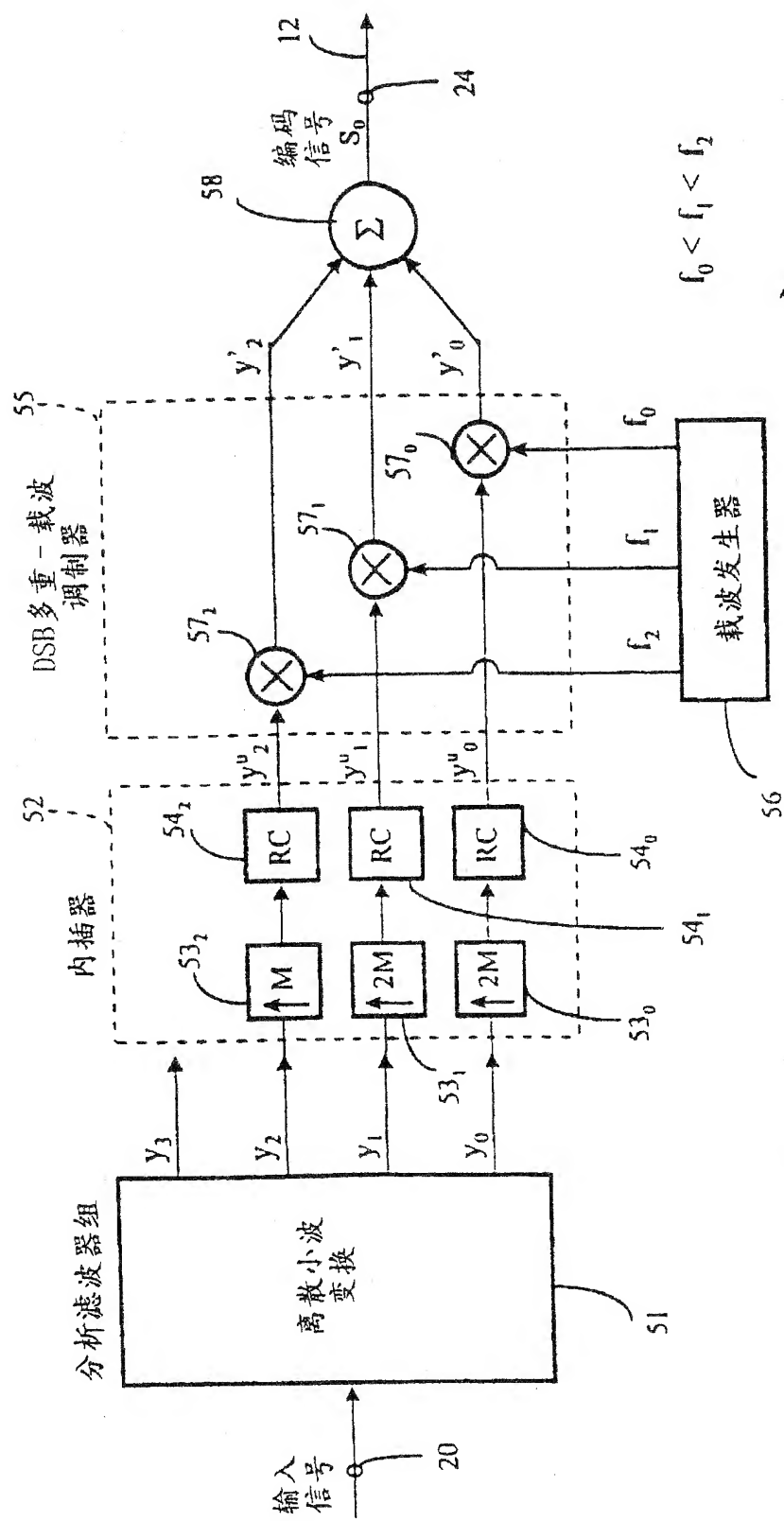


图 5

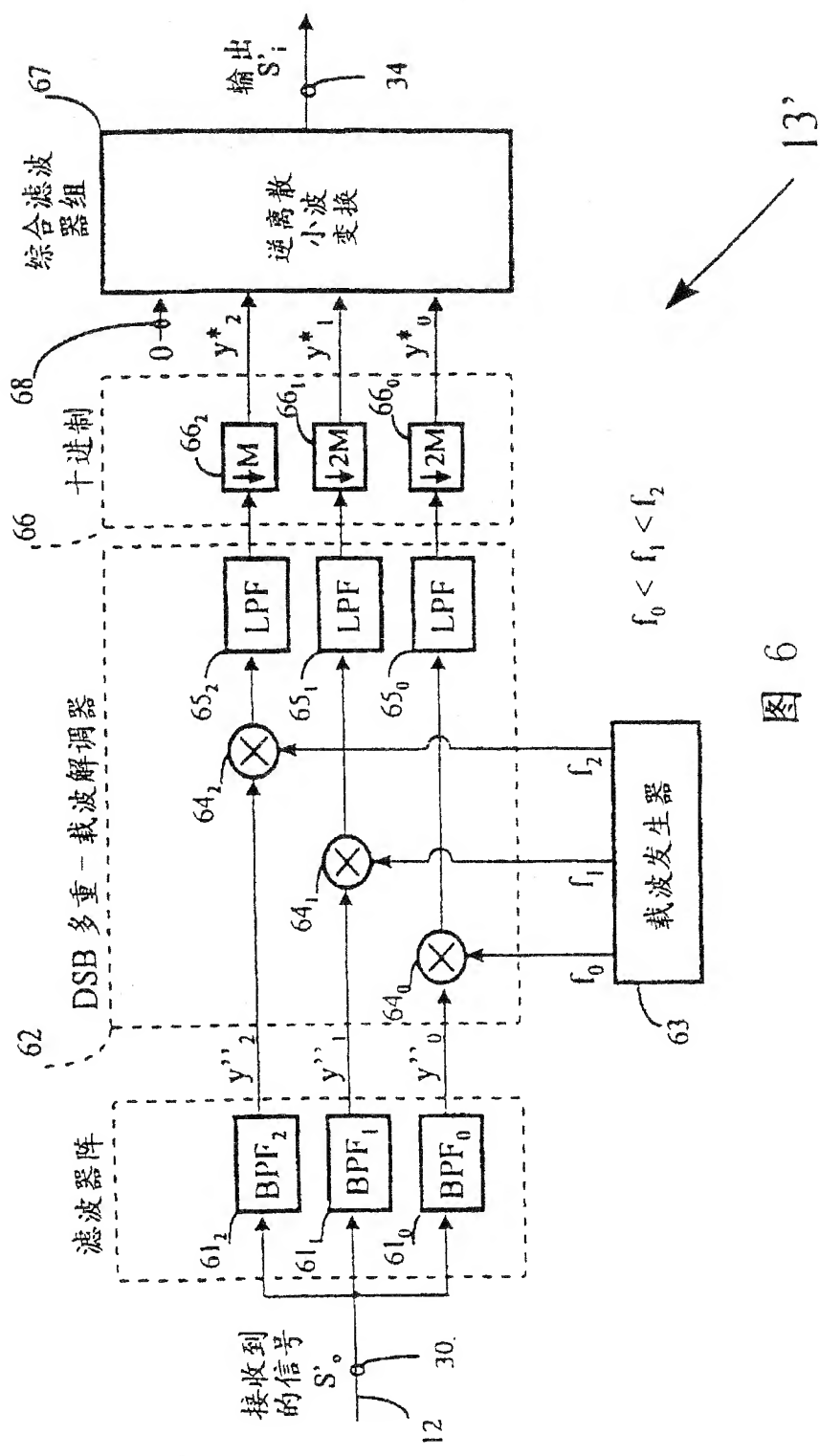
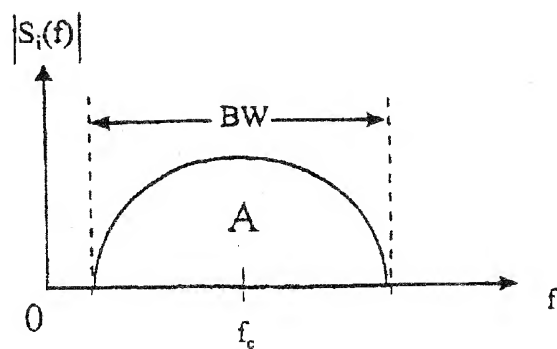


图 6

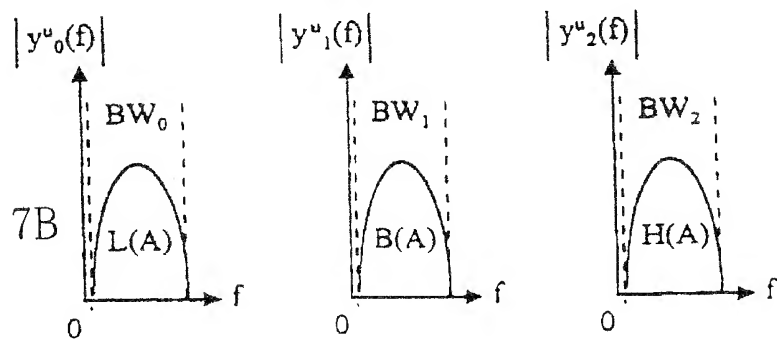


图 7A



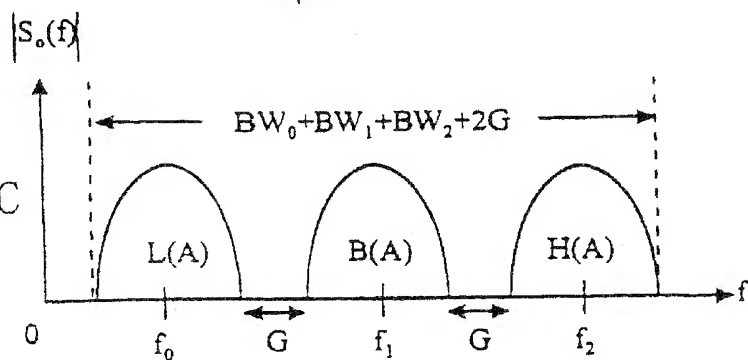
分析滤波器 +  
上采样 + RC 滤波器

图 7B



多重 - 载波 SSB

图 7C



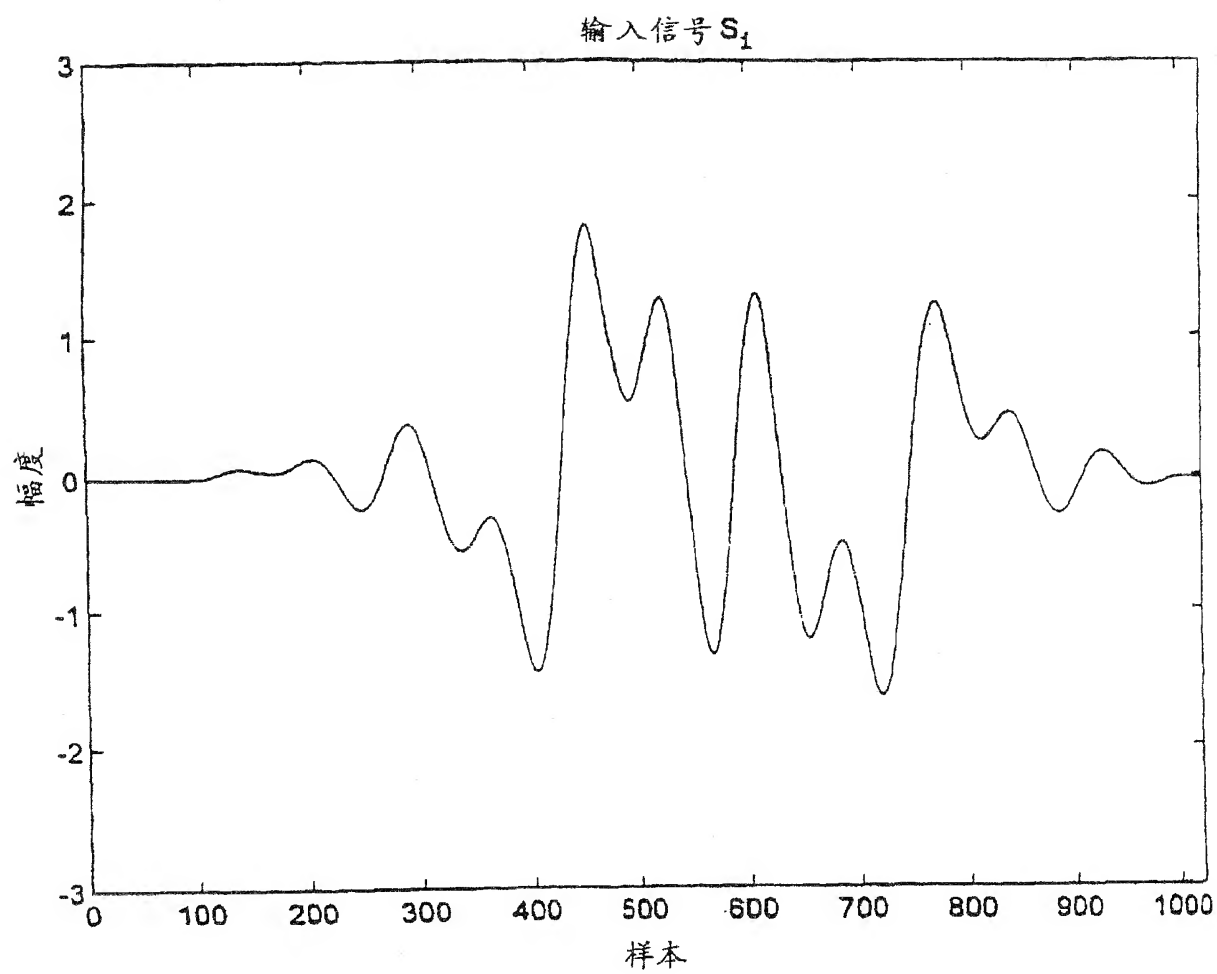


图 8

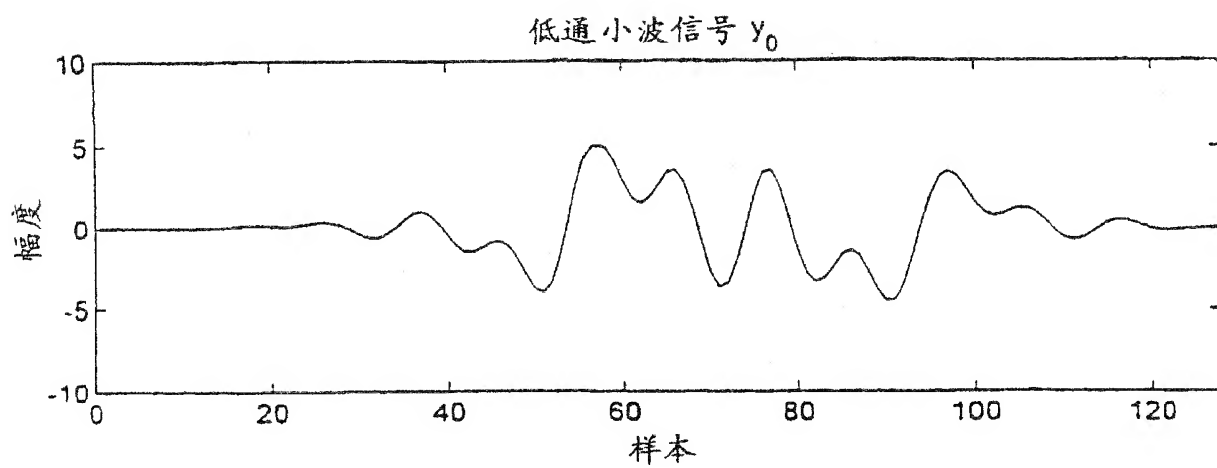


图 9A

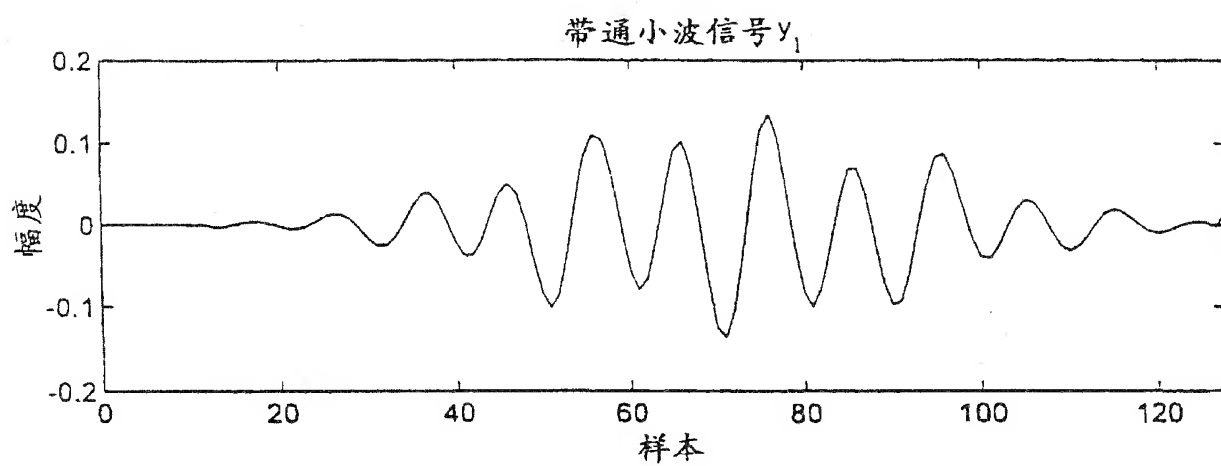


图 9B

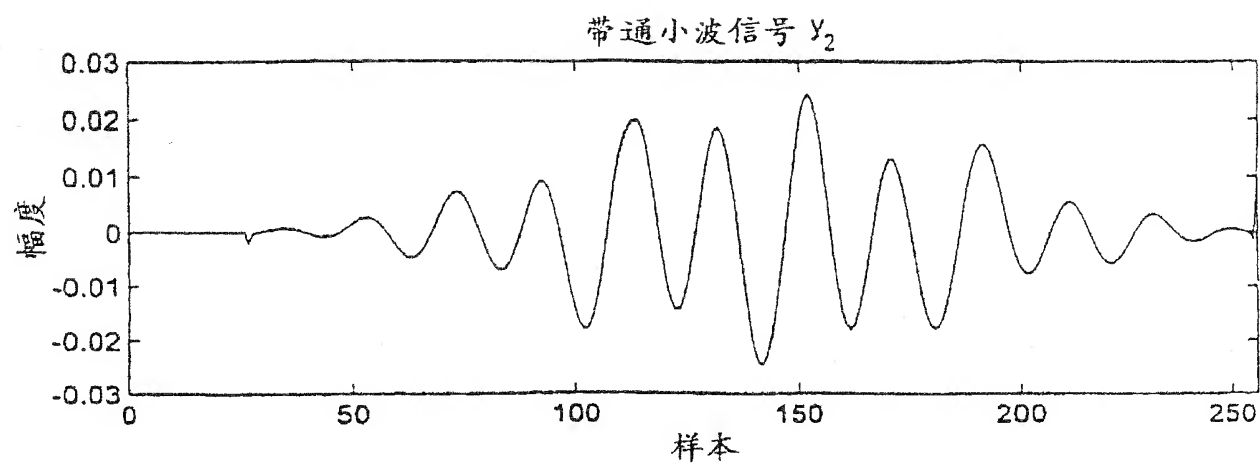


图 9C

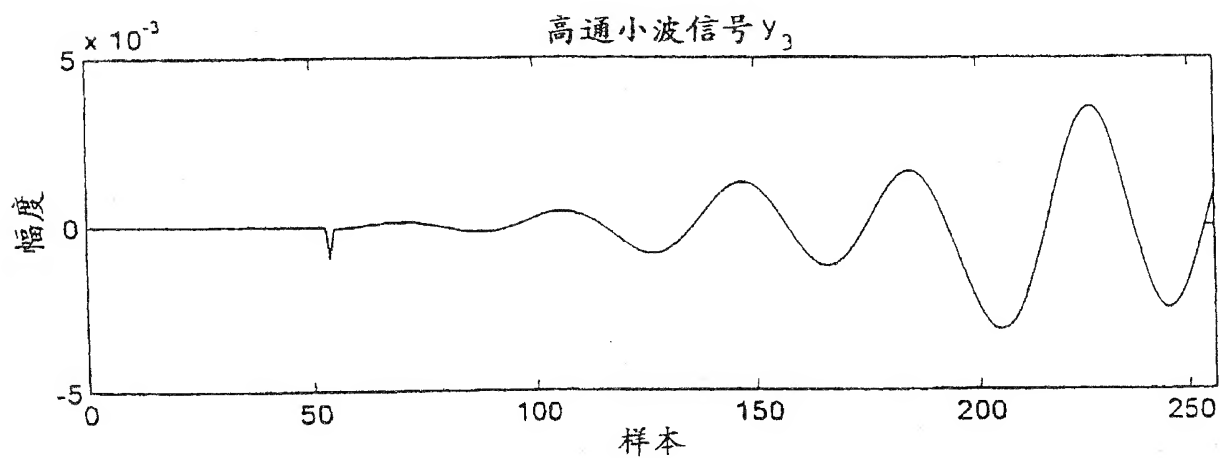


图 9D

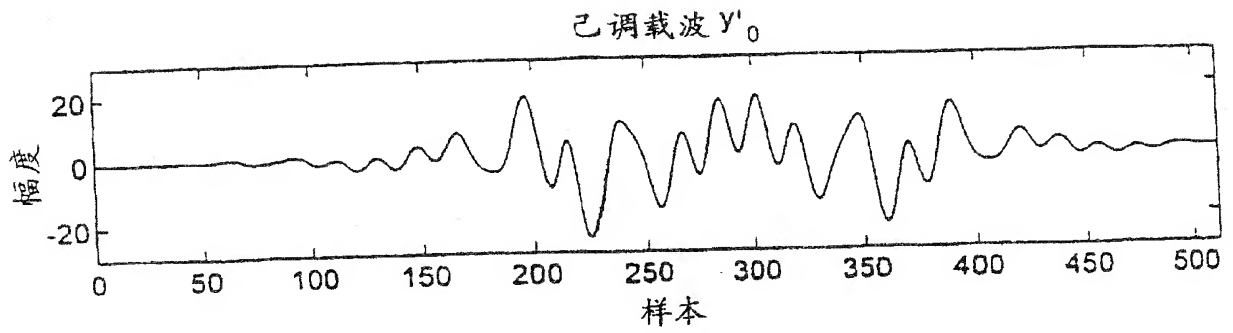


图 10A

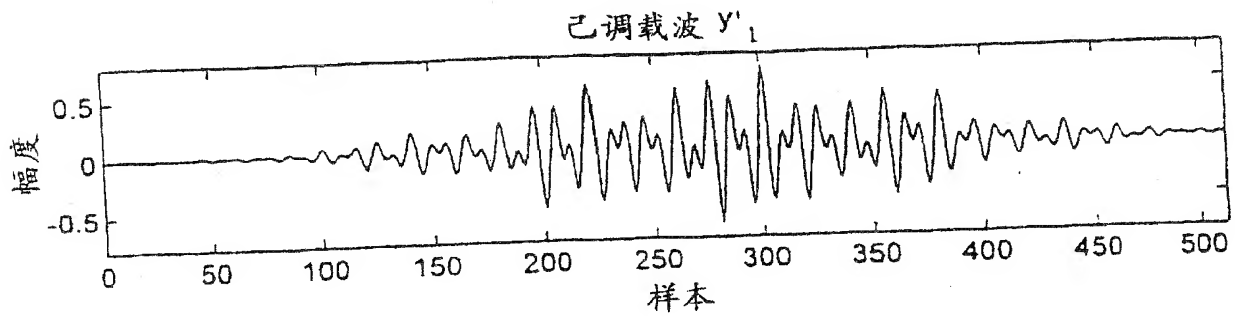


图 10B

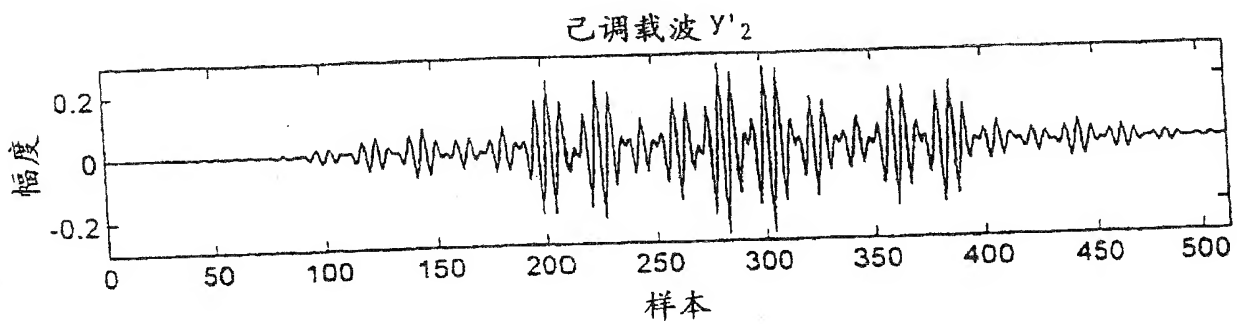


图 10C

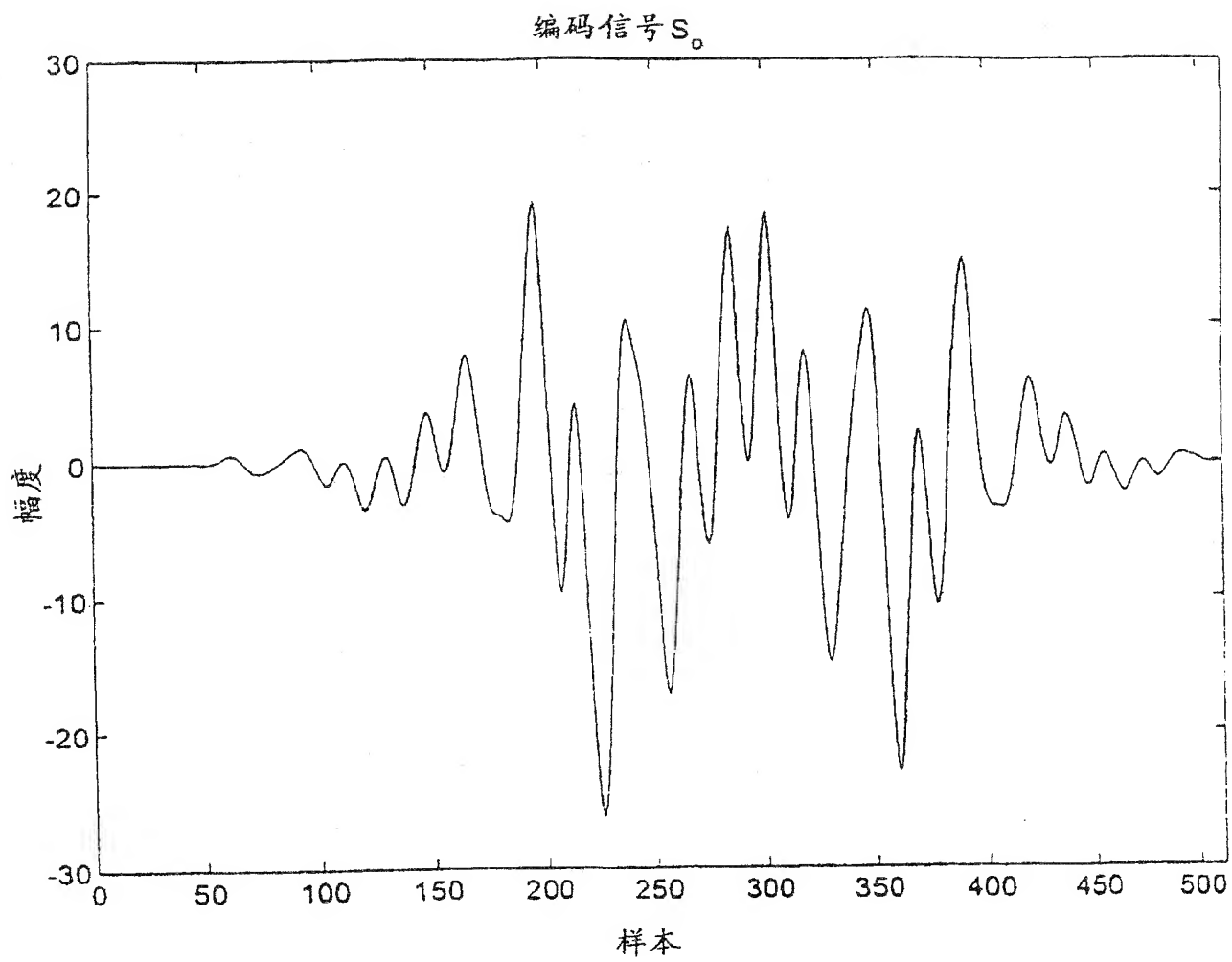


图 11

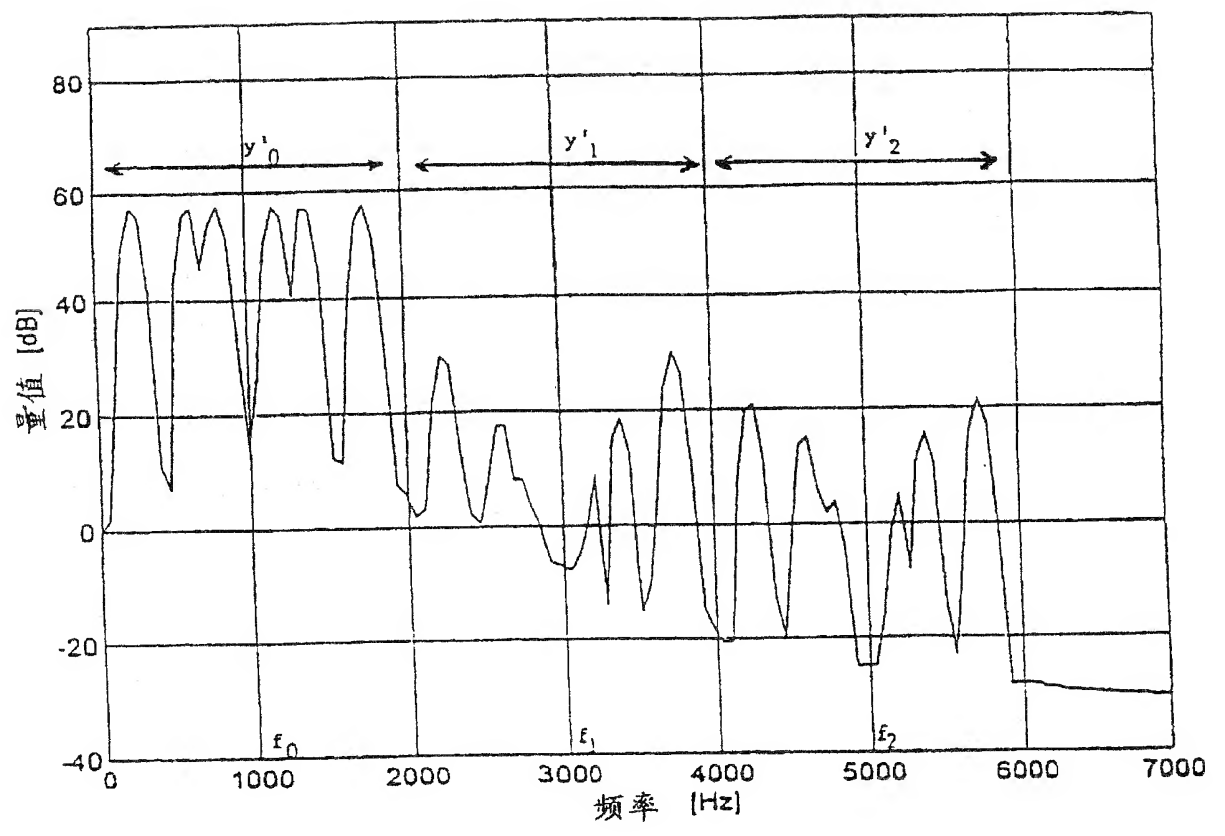


图 12



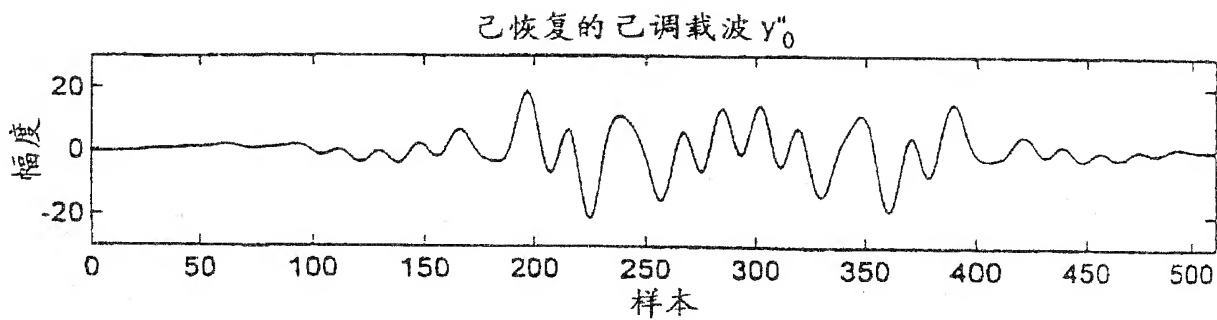


图 13A

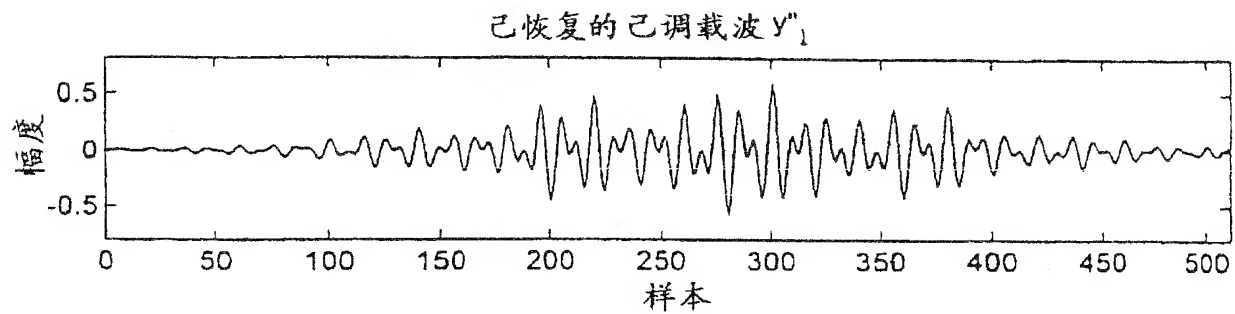


图 13B

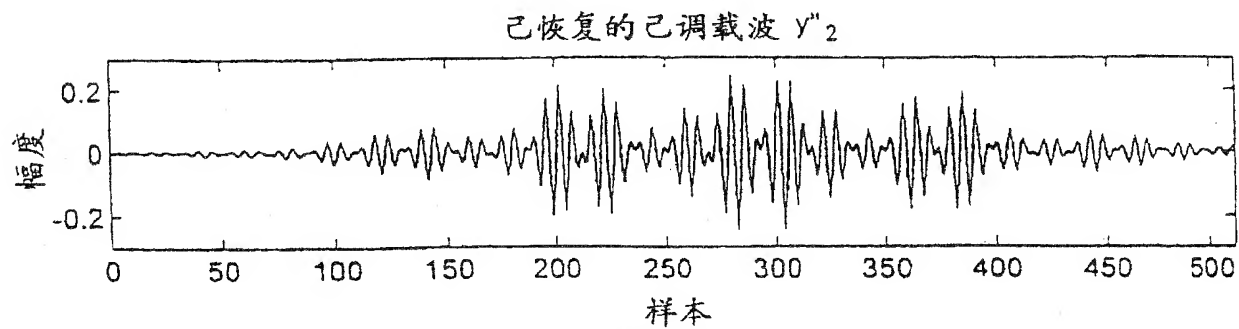


图 13C

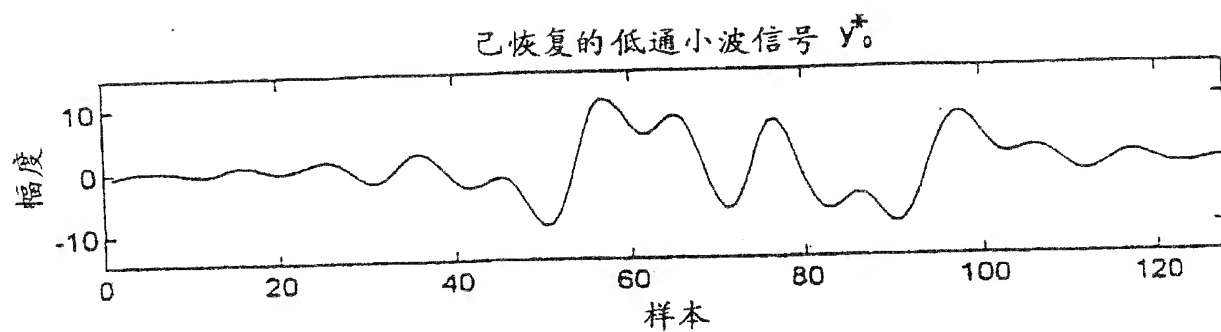


图 14A

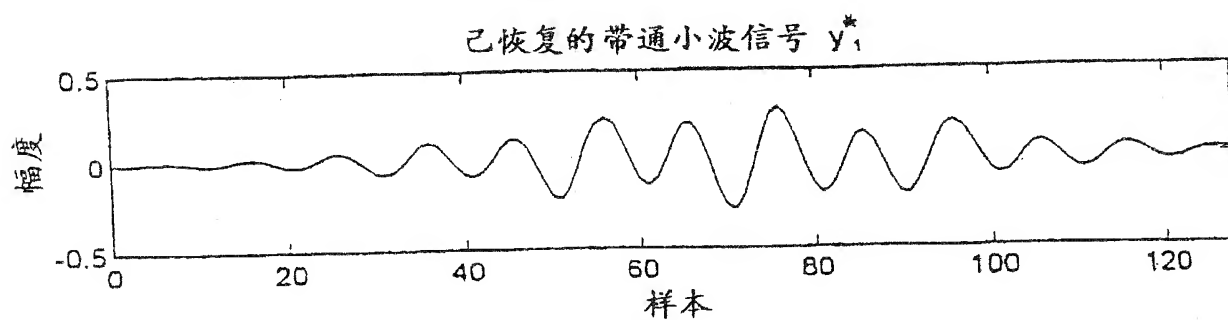


图 14B

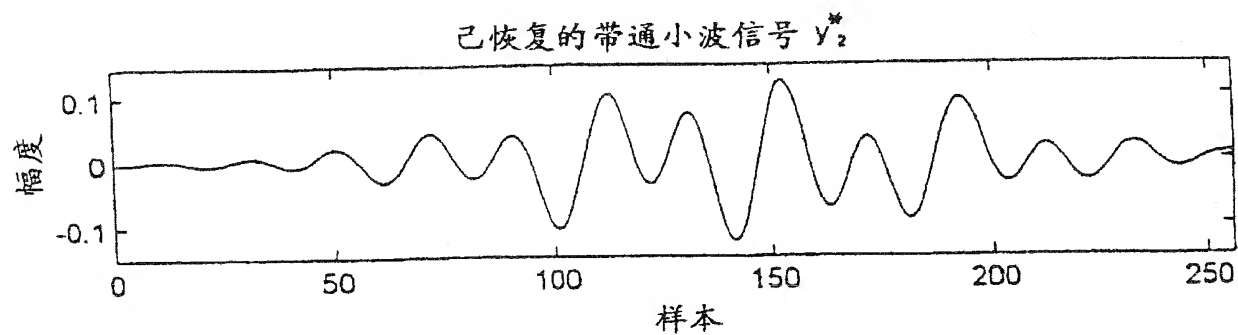


图 14C

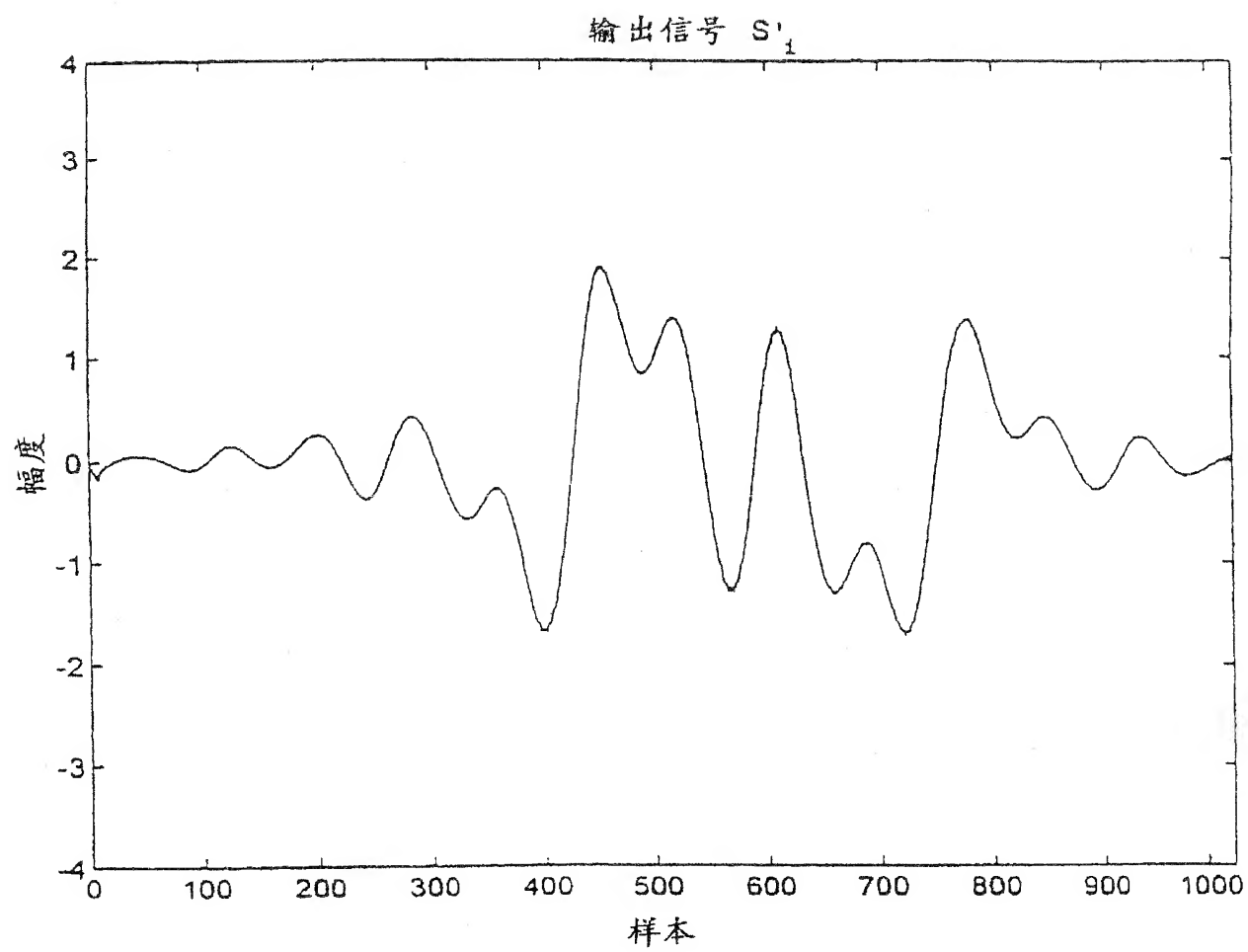


图 15